

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra částí a mechanismů strojů

Měření otisků ozubených kol

Measurement of Gears Footprints

Student: Bc. Jan Pavlík

Vedoucí diplomové práce: Ing. Milena Hrudíčková, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Pavlík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Téma: **Měření otisků ozubených kol**
Measurement of Gears Footprints
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Popište metodiku získávání a způsoby hodnocení otisků zubů ozubených kol.

Navrhněte koncept zkušebního zařízení pro získání otisků ozubených kol.

Proveďte praktické zkoušky měření otisků a zhodnocení kvality záběru ozubených kol na konkrétních soukolích dle pokynů vedoucího práce.

Nakreslete výkres sestavení zkušebního zařízení formátu min. A1 a dílenský výkres dvou vybraných dílů (bude upřesněno vedoucím práce).

Vytipujte nejvhodnější druhy nátěrových hmot spolu s metodikou nanášení a zatěžovacími podmínkami měřeného soukolí.

Zadání je zpracováno ve spolupráci se Škoda Auto a.s. Mladá Boleslav.

Seznam doporučené odborné literatury:

MORAVEC, V., DEJL, Z., NĚMČEK, M., FOLTA, Z., HAVLÍK, J.: *Čelní ozubená kola v převodovkách automobilů*. VŠB-TU Ostrava. Montanex a.s. Ostrava, 2009.

MORAVEC, V.: *Konstrukce strojů a zařízení II – Čelní ozubená kola*. Montanex a.s. Ostrava, 2001.

DEJL, Z.: *Konstrukce strojů a zařízení I – Spojovací části strojů*. Montanex a.s. Ostrava, 2000.

BOHÁČEK, F.: *Části a mechanismy strojů I - Spoje*. VUT Brno, 1987.

BOLEK, A. A KOL.: *Části strojů - svazek 1*. SNTL Praha, 1990.

NĚMČEK, M.: *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů*. 2. vydání. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1782-8.

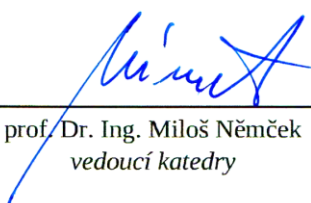
KŘÍŽ, R.: *Strojnické tabulky II - Pohony*. Montanex a.s., Ostrava, 2002.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milena Hrudíčková, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



prof. Dr. Ing. Miloš Němček
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2016

Jan Pavlík

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16.5.2016

..... Jan Pavlík

podpis

Bc. Jan Pavlík

Cementová 794/19

720 00 Ostrava - Hrabová

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PAVLÍK, J. *Měření otisků ozubených kol: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2016, 87 s. Vedoucí práce: Hrudíčková, M.

Diplomová práce se zabývá měřením otisků ozubených kol. Cílem práce je vytvoření uceleného popisu týkající se metodiky měření otisků ozubených kol tak, aby splňovala veškerá kritéria obsažená v zadání této práce. V úvodu jsou popsány hlavní faktory ovlivňující součinitele trvání záběru profilu a součinitele trvání záběru krokem. Dále je popsána metodika hodnocení otisků a jejich způsob získávání. Následuje popis zkušebního zařízení a různých typů přístrojů pro optický záznam. V experimentální části je proveden rozbor různých typů identifikačních vrstev. Na závěr jsou vyhodnoceny skutečné číselné hodnoty součinitele trvání záběru profilu a součinitele trvání záběru krokem s teoretickým výpočtem v závislosti na počtu pootočení. Součástí práce je výkresová dokumentace.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PAVLÍK, J. *Measurement of Gears Footprints: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2016, 87 p. Thesis head: Hrudíčková, M.

Master thesis deals with the measurement of gears footprints. The aim is create a comprehensive description of the methodology for measuring the footprint gears to meet all the criteria contained in the task of this work. The introduction describes the main factors affecting the coefficient of the transverse contact ratio and the face contact ratio. The next step describes the methodology of evaluation and its method of acquisition footprints. Followed by a description of the test equipment and various types of optical recording technology. In the experimental part is an analysis of different kinds of identification layers. At the end they are evaluated by real numeric values of the coefficient of the transverse contact ratio and the face contact ratio with the theoretical calculation based on the number of rotations. The work includes drawing documentation.

Obsah

Nejdůležitější užitá označení a jejich fyzikální rozměry	14
1 Úvod	15
2 Teoretické předpoklady záběru ozubených kol.....	16
2.1 Součinitel trvání záběru profilu	16
2.2 Součinitel trvání záběru krokem	17
2.3 Vliv součinitele záběru ε_α a ε_β	17
3 Faktory ovlivňující skutečnou velikost záběrového pole.....	19
3.1 Úchyly tvaru zubů a jejich hodnocení	19
3.1.1 Odchyly výrobní	19
3.1.2 Odchyly provozní.....	20
3.2 Vliv tuhosti ozubení	21
3.3 Základní typy modifikací soukolí.....	22
3.4 Záběrové poměry ozubených kol s modifikací	23
4 Metodika měření záběrových poměrů	25
4.1 Identifikační povlaky.....	25
4.1.1 Povlaky z kovů	26
4.1.2 Identifikační barvy	27
4.2 Rozbor kvality otisku	29
4.2.1 Intenzita otisku, velikost hranového záběru	29
4.2.2 Orientace otisku z hlediska chyby šroubovice	30
4.2.3 Orientace otisku z hlediska chyby úhlu záběru.....	31
4.2.4 Orientace otisku z hlediska velikosti modifikace	31
4.3 Popis metodiky získávání otisků dle požadavků průmyslového partnera	32
4.3.1 Příprava povrchu zubů	32
4.3.2 Aplikace identifikační barvy	33
4.3.3 Zhotovení otisku.....	34
4.3.4 Vyfotografování vzniklého otisku k následnému rozboru	34
4.3.5 Čištění soukolí od identifikační barvy	35
5 Koncept zkušebního zařízení	36

5.1	Vyvozování zatížení na zkušebním zařízení.....	36
5.1.1	Elektromotor.....	36
5.1.2	Brzdný odpor.....	38
5.2	Způsoby vytvoření snímků otisků k vyhodnocení.....	39
5.2.1	CCTV minikamera.....	39
5.2.2	Endoskop Voltcraft.....	40
5.2.3	Endoskop SKF.....	41
5.2.4	Mikroskop dnt.....	43
5.3	Dílčí závěr.....	44
6	Nejvhodnější druh nátěrové hmoty a způsob její aplikace.....	45
6.1	Gear marking compound.....	48
6.2	Experimentálně odzkoušené barvy.....	49
6.2.1	Tušírovací pasta modrá.....	49
6.2.2	Tušírovací pasta žlutá.....	50
6.2.3	Barva Acrylic.....	51
6.2.4	Barva Prima.....	52
6.2.5	Barva Prisma.....	53
6.2.6	Tempera.....	54
6.2.7	Olejová barva.....	55
6.2.8	Oxid titaničitý.....	56
6.3	Dílčí závěr.....	57
7	Rozbor otisků z hlediska počtu pootočení.....	58
7.1	Gear marking compound.....	59
7.2	Ověření vlivu působení různorodosti tvarů vyrobených zubů.....	64
7.3	Oxid titaničitý.....	67
7.4	Porovnání otisků.....	71
7.4.1	Srovnání otisků při 1. pootočení.....	72
7.4.2	Srovnání otisků při 10. pootočení.....	72
7.5	Dílčí závěr.....	73
7.5.1	Vliv na hodnocení výšky.....	73

7.5.2	Vliv na hodnocení šířky	74
8	Ověření skutečných záběrových poměrů.....	75
8.1	Geometrický výpočet ozubení	75
8.2	Porovnání skutečného záběru s teoretickým předpokladem.....	78
8.2.1	Gear marking compound.....	78
8.2.2	Oxid titaničitý.....	80
8.3	Dílčí závěr	81
9	Závěr.....	83
	Seznam použité literatury.....	85
	Seznam příloh.....	86

Nejdůležitější užitá označení a jejich fyzikální rozměry

Označení	Popis veličiny	Jednotka
F_m	Normální síla mezi zuby	N
F_α	Celková úchylka profilu	μm
F_β	Úchylka sklonu zubů	μm
b_e'	Skutečná šířka záběru boku zubu	mm
b_w	Společná šířka boků zubů	mm
c	Tuhost ozubení	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$
c_a	Výšková modifikace	μm
c_b	Délková modifikace	μm
$f_{H\alpha}$	Úchylka úhlu profilu	μm
$f_{H\beta}$	Úchylka úhlu sklonu zubu	μm
$f_{H\beta}^d$	Souhrnná vnější deformační úchylka	μm
f_{be}	Úchylka ložisek včetně jejich vůle	μm
f_{bh}	Úchylka ohybu hřídele	μm
f_{bk}	Úchylka ohybu tělesa kola	μm
f_{ca}	Úchylka tělesa skříně	μm
f_{pt}	Úchylka čelní rozteče	μm
f_{tk}	Úchylka krutu tělesa kola	μm
f_{ta}	Úchylka tvaru profilu	μm
$f_{t\beta}$	Úchylka tvaru sklonu zubů	μm
g_a	Dráha záběru	mm
m_n	Normální modul	mm
p_n	Normální rozteč	mm
p_x	Osová rozteč	mm
w	Šířkového zatížení zubů	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$
α	Úhel záběru	°
β	Sklon zubů	°
$\Delta\beta_b$	Úhlové natočení záběrového pole	°
δ	Úchylka ozubení	μm
ε_α	Součinitel trvání záběru profilu	-
ε_β	Součinitel trvání záběru krokem	-
ε_γ	Součinitel trvání záběru celkový	-

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou měření otisků ozubených kol v převodovce. Vytvoření skutečných záběrových otisků pomocí nanesené identifikační vrstvy na bok zubu se v praxi využívá k porovnání s teoretickými záběrovými předpoklady. Zároveň se touto metodou ověřuje správnost provedených geometrických modifikací, které upravují geometrii zubů s ohledem na vznikající deformace při provozování převodovky.

Měření otisků ozubených kol je metoda poměrně levná, z konstrukčního hlediska jednoduchá a poměrně přesná. V současnosti je hojně využívána zejména při konstrukci automobilových převodovek, a proto u ní dochází k určitému vývoji. K tomuto rozvoji bezpochyby přispívá nejen požadavek co nejmenší zástavby, ale především co nejnižší generování hluku a vibrací.

Problematika měření otisků ozubených kol není v běžně dostupné literatuře podrobně popsána. Rovněž firmy využívající tuto metodu ve výrobě nejsou v tomto směru příliš konkrétní a to kvůli ochraně svých vlastních poznatků. Z těchto důvodů je v této diplomové práci detailně popsán návrh metodiky nanášení, fotografování a hodnocení vzniklých otisků včetně faktorů, které mohou výsledný otisk ovlivnit, a to převážně negativním způsobem.

Cíle práce:

- Teoretické předpoklady záběru ozubených kol.
- Faktory ovlivňující skutečnou velikost záběrového pole.
- Metodika měření záběrových poměrů.
- Koncept zkušebního zařízení.
- Nejvhodnější druh identifikační vrstvy.
- Rozbor otisků z hlediska počtu pootočení.
- Ověření skutečných záběrových poměrů.

2 Teoretické předpoklady záběru ozubených kol

Celá kapitola vychází z poznatků popsaných v [1] a [2], odkud jsou v některých případech texty přímo převzaty.

Tato kapitola se věnuje teoretickému rozboru hlavní problematiky záběru ozubených kol. Pro lepší porozumění záběrových vlastností ozubeného soukolí jsou zde popsány základní podmínky pro volbu optimálního součinitele trvání záběru profilu ε_α a součinitele trvání záběru krokem ε_β .

2.1 Součinitel trvání záběru profilu

Vyjádřuje poměr dráhy záběru v čelní rovině k základní rozteči (viz obrázek 1). Výsledná hodnota součinitele trvání záběru profilu udává počet párů zubů v záběru. V praxi to znamená, že pro existenci funkčního standardního soukolí s přímými zuby, musí být hodnota $\varepsilon_\alpha > 1$. Ideální plynulosti se dosáhne, jen u teoretického soukolí.

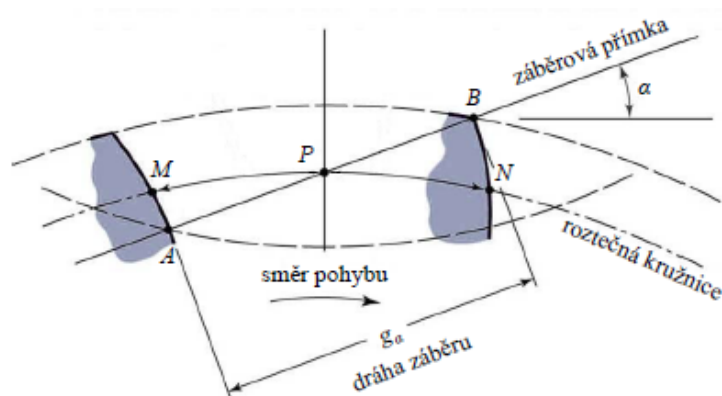
Reálně vyrobené a provozované soukolí se základním profilem mají obvykle hodnotu součinitele ε_α v oblasti 1,3 až 1,8. To znamená, že během záběru ozubení se střídá jednopárový a dvoupárový záběr. Hlavním důvodem, proč součinitel u reálných soukolí nedosahuje celočíselných hodnot, jsou výrobní a provozní faktory.

Vzhledem k tomu, že se zuby pod zatížením deformují, dochází zejména během vstupu zubů do záběru ke geometrické neshodě spoluzabírajících evolventních profilů (vstupují do záběru předčasně), což je příčinou vibrací a následného hluku ozubení. Toto je pochopitelné jen jedním z řady důvodů příčin vibrací a hluku v ozubení. Tento problém se snažíme eliminovat dvěma způsoby:

- výrobou šikmého ozubení, jak je popsáno dále,
- návrh soukolí s celočíselným součinitelem.

Řešením tohoto problému je návrh ozubeného soukolí se součinitelem záběru $\varepsilon_\alpha = 2$, aby v okamžiku výstupu jednoho páru spoluzabírajících zubů ze záběru, vstupoval druhý pár zubů do záběru. Tím dojde k rozložení přenášeného krouticího momentu mezi dva páry spoluzabírajících zubů. Této hodnoty ovšem nelze dosáhnout u standardního ozubení s úhlem záběru $\alpha = 20^\circ$. Je nutné vytvořit ozubení s tzv. nestandardním profilem označovaný jako dlouhé zuby nebo HCR ozubení.

Snížením úhlu záběru se sice dá dosáhnout zvýšení součinitele záběru, ale za cenu oslabení zubu, který je pak náchylný ke zlomení.

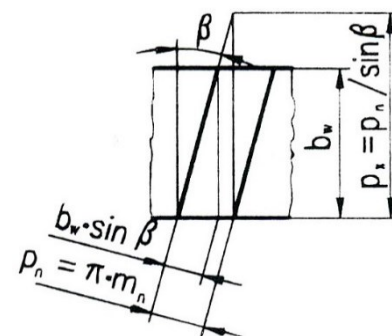


Obrázek 1: Teoretické znázornění dráhy záběru [4]

2.2 Součinitel trvání záběru krokem

Šikmé ozubení prodlužuje dobu trvání záběru spoluzabírajících zubů ozubení o tzv. krok šikmých zubů. Ten je vyjádřen poměrem společné záběrové šířky ozubení k osové rozteči. V praxi to znamená, že pomocí šikmého ozubení vzniká delší záběrová boční křivka, po které dochází k odvalování zubů (viz obrázek 2). Úhel β dále ovlivňuje součinitel záběru ε_α , u kterého dosahujeme podstatně nižších hodnot než u soukolí s přímými zuby. Velikost součinitele trvání záběru krokem ε_β lze velice snadno měnit pomocí společné záběrové šířky ozubení a úhlu sklonu zubů. Díky tomu můžeme dosáhnout libovolných hodnot pro každý modul. [3]

Díky geometrickým poměrům lze u šikmého ozubení i snížit minimální počet zubů, jelikož jejich počet je výrazně závislý právě na jejich sklonu β .



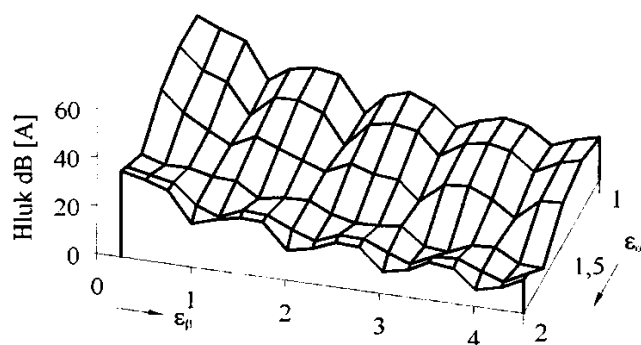
Obrázek 2: Prodloužená záběrová boční křivka u šikmého ozubení [1]

2.3 Vliv součinitele záběru ε_α a ε_β

Součtem součinitelů záběru ε_α a ε_β získáme součinitel celkového trvání záběru ε_γ . Ten udává počet párů zubů, které se současně nacházejí v záběru. Je-li výsledný součet v rozmezí $1 < \varepsilon_\gamma < 2$, v záběru se střídají jeden a dva páry zubů, dosahuje-li například $\varepsilon_\gamma = 2$, jsou teoreticky trvale v záběru dva páry zubů. Samotné stanovení velikosti součinitelů záběru ε_α a ε_β závisí na použití ozubeného soukolí, únosnosti, obvodové rychlosti, požadavcích na tichý chod atd. Právě požadavek na tichý chod hraje nezbytnou roli při návrhu ozubeného soukolí.

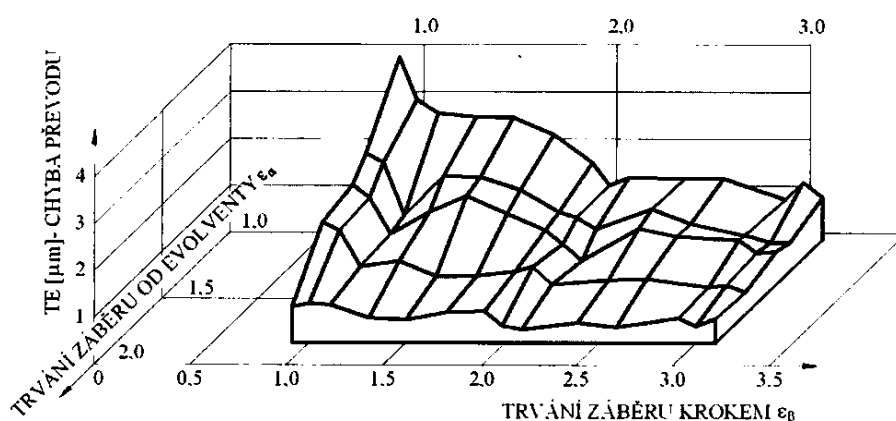
Ten totiž úzce souvisí s velikostmi součinitelů ε_α , ε_β a zároveň má pozitivní vliv na celkovou únosnost, rozměrovou zástavbu a hmotnost.

Experimentálně bylo prokázáno, že k minimálnímu buzení hluku a vibrací dochází kolem celočíselných hodnot. Na následujícím grafu (obrázek 3) je definován pro nekorigované šikmé zuby vliv trvání záběru profilu ε_α a vliv trvání záběru krokem ε_β v závislosti na buzení hluku.



Obrázek 3: Vliv hluku na součiniteli záběru profilu a krokem [1]

S buzením hluku a vibrací úzce souvisí chyba převodu. Chyba převodu je parametr, který by měl pomocí jednoho čísla popsat sumární vliv všech nepřesností včetně jejich váhy vlivu. Díky tomu je možné charakterizovat očekávanou velikost hluku a vibrací generovanými ozubenými koly. Teoretické evolventní ozubení během svého chodu nemění svou obvodovou rychlost a je tak ideálním systémem převodu. Tento ideální záběr je u reálných ozubených kol narušen zejména výrobními tolerancemi, průhyby hřídelů a deformacemi zubů od zatížení. Jednotlivé zmíněné nepřesnosti mají různý vliv na vibrace a hluk ozubení, jejich vlivy se mohou sčítat, nebo vzájemně eliminovat. Následující obrázek (obrázek 4) definuje vliv trvání záběru od evolventy ε_α a vliv trvání záběru krokem ε_β v závislosti na chybě převodu.



Obrázek 4: Vliv chyby převodu na součiniteli záběru profilu a krokem [2]

Z výše uvedených obrázků je patrné, že oba průběhy jsou si velice podobné. K minimálnímu buzení vibrací bude docházet, je-li ε_α nebo ε_β celočíselné, největší pokles je v bodech, jsou-li celočíselné oba. Z grafu (viz obrázek 3) je možné zjistit zajímavou skutečnost, a to lokální snížení hluku pro součinitel záběru $\varepsilon_\alpha = 1,7 \div 1,8$.

3 Faktory ovlivňující skutečnou velikost záběrového pole

Celá kapitola vychází z poznatků popsaných v [1] a [2], odkud jsou v některých případech texty přímo převzaty.

Nepřesnost záběru citelně ovlivňuje únosnost, hluk a vibrace. Faktory, které lze změřit, případně simulovat pomocí metody konečných prvků, jsou popsány v této kapitole. Díky tomu je možné pomocí náměrových grafů do jisté míry tyto nepřesnosti kompenzovat modifikacemi.

3.1 Úchyly tvaru zubů a jejich hodnocení

Výrobní a provozní odchylky způsobují díky své nepřesnosti od teoretické geometrie ozubení generování hluku a vibrací. Zároveň snižují celkovou únosnost, zejména v dotyku. Tyto odchylky lze do určité míry kompenzovat patřičnou úpravou teoretického tvaru boku zubu. Dojde tak k úpravě tvaru evolventy a boční křivky. Hovoříme tedy o výškové modifikaci (změna tvaru evolventy) a podélné modifikaci (změna tvaru boční křivky).

3.1.1 Odchylky výrobní

Vyrobené ozubené kolo se rozměrově nikdy neshoduje s teoretickým návrhem. Během výroby vznikají úchyly od požadovaného tvaru ozubení a od rovnoběžnosti os otáčení kol. Musejí však být v souladu s normou [6], která předepisuje soustavu přesnosti vzájemně stejnohlých boků zubů čelních kol s evolventním ozubením.

Velikost vzniklých odchylek závisí nejen na výrobní přesnosti strojů, ale hlavně na výrobním procesu ozubených kol ve finální fázi. Při obrábění za měkka (zuby ozubeného kola jsou nejprve finálně dokončeny ševingováním a následně tepelně upraveny) vzniknou daleko větší výrobní úchyly než při obrábění za tvrda (zuby ozubeného kola jsou nejprve tepelně upraveny a následně finálně dokončeny broušením a honováním). S ohledem na kvalitu záběru soukolí jsou nedůležitější úchyly roztečí, profilu a sklonu zubů.

Čelní profil:

- Úchylka čelní rozteče f_{pt}
- Celková úchylka profilu F_{α}
- Úchylka tvaru profilu $f_{t\alpha}$
- Úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$

Boční profil křivky:

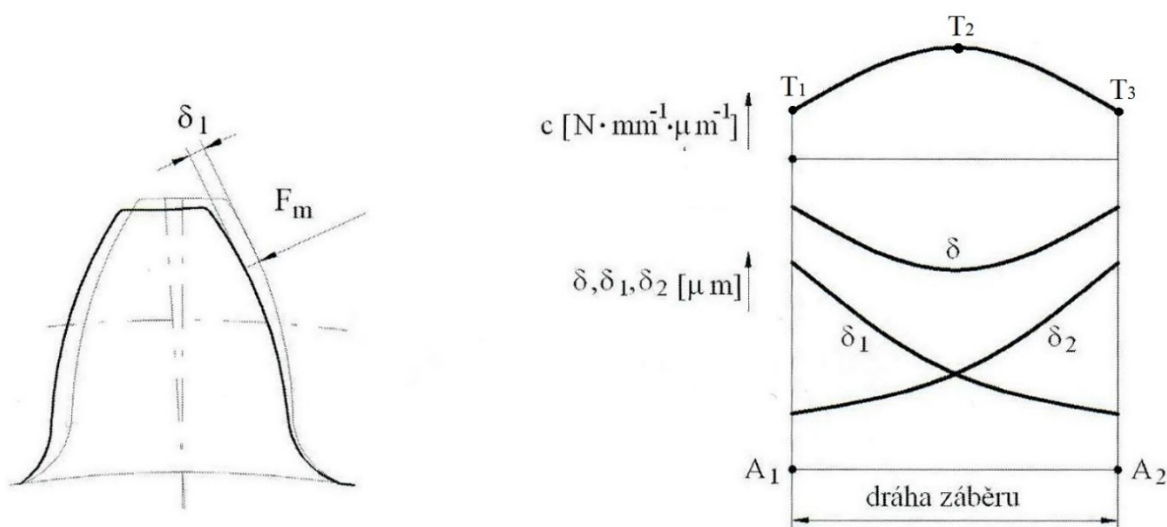
- Úchylka sklonu zubů F_{β}
- Úchylka tvaru sklonu zubů $f_{t\beta}$
- Úchylka úhlu sklonu zubu $f_{H\beta}$

3.1.2 Odchylky provozní

Během provozního zatížení ozubeného soukolí vznikají deformace zubů, těles ozubených kol, hřídelů, ložisek a převodových skříní. Ložiska zde bývají velice choulostivou součástí, protože kromě samotné deformace je velmi podstatná i jejich vůle, která značnou mírou zasahuje do výsledné provozní odchylky.

Úchylka ozubení δ :

Zub se během provozního zatížení neustále deformuje tím, jak vchází a odchází ze záběru. Největším ovlivňujícím faktorem je zde tuhost ozubení, kterému se podrobněji věnuje následující podkapitola 3.2. Obrázek 5 znázorňuje deformaci zubu, kde je tenkou čarou nakreslen nedeformovaný zub a silnou čarou deformovaný. Jeho deformace δ_1 je dána součtem deformace ohybové, smykové, tlakové, od místního Hertzova tlaku v místě dotyku a od torzní deformace, kdy dochází k nerovnoměrnému rozložení zatížení po šířce zubu (viz obrázek 6). Na následujícím obrázku (obrázek 5) je znázorněn průběh deformace spoluzabírající pár zubů δ_1 a δ_2 v závislosti na dráze záběru. Výsledný průběh deformace je dán součtem $\delta = \delta_1 + \delta_2$. Největší hodnota deformace vzniká na hlavě zubu, jde o stav, kdy zub vstupuje do záběru. Tyto deformace jsou nositelkami prudkých změn rozložení zatížení jednotlivých párů zubů při záběru a jsou příčinou vzniku hluku a vibrací.

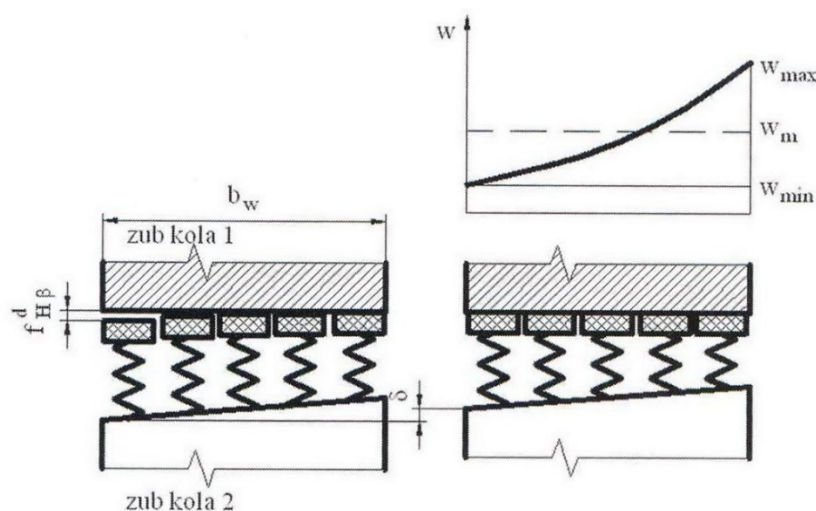


Obrázek 5: Úchylka ozubení (vlevo); průběh deformace a tuhosti (vpravo) [2]

Souhrnná vnější deformační úchylka $f_{H\beta}^d$

Je dána součtem všech dílčích úchylek (ohyb hřídele f_{bh} , ohyb tělesa kola f_{bk} , krut tělesa kola f_{tk} , ložisek včetně jejich vůle f_{be} , tělesa skříně f_{ca}), které způsobí nerovnoměrné rozložení zatížení podél boku zubu. Takové zatížení je prezentováno na následujícím obrázku pomocí pružin (viz obrázek 6). Stejně dlouhé pružiny představují velikost zatížení působící při záběru soukolí mezi kolem a pastorkem. Díky souhrnné deformační úchylce je kolo naklopeno vůči

pastorku. Z toho je zřejmé, že na bok zubu tlačí pružiny různými silami. Výsledná velikost působících sil na bok zubu je znázorněna průběhem šířkového zatížení w . Dosahuje-li úchylna $f_{H\beta}^d$ značné velikosti, nemusí dojít k dotyku po celé šířce boku zubu. V tomto případě se podstatně zvětší rozdíl $w_{max} - w_{min}$, kdy w_{min} může dosahovat nulové hodnoty (dochází k tzv. hranovému záběru).



Obrázek 6: Nerovnoměrnému rozložení zatížení po šířce zubu [2]

3.2 Vliv tuhosti ozubení

Na tuhosti ozubení závisí způsob rozložení sil při záběru ozubených kol podél záběrových přímků i mezi jednotlivými páry spoluzabírajících zubů. Tím jsou podstatně ovlivňovány součinitele trvání záběru ε_α a ε_β . Zároveň čím menší je kolísání tuhosti zubů v průběhu záběru, tím víc dochází ke snižování buzení hluku a vibrací. Díky tomu je i velikost potřebných modifikací prováděných na boku zubu menší, jelikož dochází k redukci interference (stav, kdy při záběru zubů je část prostoru současně zabrán dvěma spoluzabírajícími zuby, dochází tak ke střetávání materiálu).

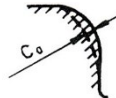
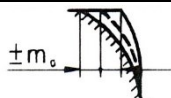
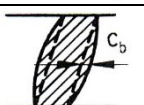



Teoretický výpočet tuhosti je uveden v normě [8] nebo [9], vzhledem ke složitému tvaru zubů a různým záběrovým podmínkám je značně obtížný. Z tohoto důvodu se tuhost nejčastěji stanovuje pomocí metody konečných prvků nebo experimentálně. Velikost tuhosti zubu se proměnlivě mění v závislosti na místě dotyku spoluzabírajícího zubu. Průběh tuhosti c dvou spoluzabírajících zubů je grafickým průběhem zobrazen na výše uvedeném obrázku (obrázek 5).

V bodech T1 a T3, tzn. na začátku a konci záběru je tuhost vždy nejmenší. Zatížení v těchto bodech je přenášeno na největší možné vzdálenosti od paty zubu. Proto působící síla způsobuje podstatně větší deformaci zubu než v bodě T2, kdy zatížení je přenášeno na nejmenší možné vzdálenosti od paty zubu. Právě rozdíl velikostí deformací v bodech T1, T2 a T3 určuje tuhost ozubení.

3.3 Základní typy modifikací soukolí

Jak už bylo zmíněno, tak skutečný tvar zubů ozubených kol se liší od teoreticky uvažovaného, kvůli technologickým a provozním důvodům. Další úpravy tvaru zubu spočívají ve vytvoření úmyslných odchylek od teoretického boku zubu. Tento proces nazýváme modifikací boků zubů, které kompenzují nepříznivý vliv na záběr ozubených kol. Přehled modifikací je názorně uveden v následující tabulce (tabulka 1).

Tabulka 1: Základní typy modifikací soukolí [1]

Typ úpravy boku zubu			Schéma tvaru modifikace	Popis účinků modifikace
			— modifikace ---- teoretický tvar	
Modifikace	Výšková modifikace	Tvar evolventy		Kompenzuje nepřesnosti rozteče, profilu a deformace zubů při velkých změnách zatížení.
		Změna úhlu záběru		Kompenzuje deformace zubů, teplotní změny a větší deformace hřídelů.
	Podélná modifikace	Změna tvaru boční křivky		Kompenzuje výrobní úchytky sklonu zubů, deformace hřídelů u kol při velkých změnách zatížení.
		Změna úhlu šroubovice		Kompenzuje deformace hřídelů kol při pohonu a brzdění nebo při reverzaci pohonu.
Sražení hrany na hlavě zubu				Zabraňuje poškození hran před kalením, vzniku přídavných pnutí a odstraňuje otřepy.
Protuberantní podřezání				Uspadnění finálních operací (broušení, ševingování) a snížení vrubových účinků.

Modifikace kompenzují nepříznivý vliv následujících faktorů na provoz ozubení:

- deformaci zubů, těles ozubených kol, hřídelů a jejich uložení
- nepřesnosti výroby ozubení a montáže ozubených soukolí
- teplotní deformaci způsobenou rozdílnými teplotami jednotlivých kol a nestejnými teplotami po šířce ozubení
- deformace ozubení, které vznikají při tepelném zpracování ozubených kol

Výšková modifikace:

Velikost předepsané výškové modifikace c_a souvisí s přesností, tuhostí a zatížením zubů. Obecně platí, že čím větší je tuhost zubů, které mají větší přesnost a jsou zatěžovány menší silou, tím jsou modifikace menší. Její velikost se navrhuje jen pro určitou hodnotu zatížení. V případě, že bude velikost zatížení větší, tak sice dojde ke vstupnímu a výstupnímu rázu.

Ten je však menší než u nemodifikovaného záběru zubů. V opačném případě, kdy velikost zatížení bude menší než velikost deformace, zkrátí se délka záběrové úsečky.

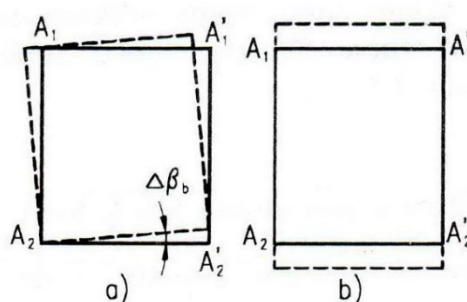
Podélná modifikace:

Velikost předepsané modifikace c_b závisí na velikosti deformačních a výrobních úchylkách, které způsobují nerovnoměrné zatížení podél šířky zubu. Obecně platí, že čím jsou deformační a výrobní úchyly menší, tím jsou modifikace menší. Jelikož se hodnota podélné modifikace odvíjí hlavně od způsobu zatěžování, lze určit velikost modifikace jen pro určitou hodnotu. V případě, že bude velikost zatížení větší, dojde sice k nerovnoměrnému rozložení zatížení podél boční křivky zubů, nicméně síla bude působit na větší ploše než u nemodifikovaného záběru zubů. V opačném případě, kdy velikost zatížení bude menší, zmenší se dotyková plocha pro rozložení zatížení.

Poslední úpravou podélné modifikace prováděné na boku zubu je sražení hran. Ke sražení hran dochází na hlavě a čele zubu, díky kterému se odstraní otřepy vzniklé při výrobě ozubení. Dojde tak k zamezení vzniku přídatných pnutí na ostrých hranách při následném tepelném zpracování, i k potlačení poškození v těchto místech při manipulaci.

3.4 Záběrové poměry ozubených kol s modifikací

Záběrové pole ozubeného soukolí mění svou polohu a tvar vlivem působení proměnlivého zatížení. Deformace vzniklé při záběru soukolí mají za následek úhlové natočení záběrového pole o $\Delta\beta_b$, které je schematicky znázorněno na následujícím obrázku (obrázek 7 a). A také může také docházet ke zvětšování záběrového pole při ohybu zubů v záběru (viz obrázek 7 b).

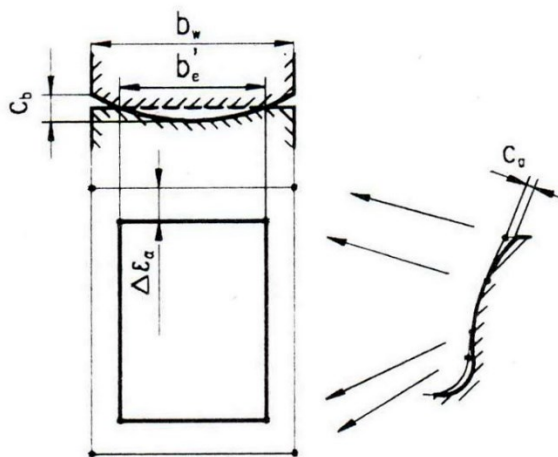


Obrázek 7: Změna záběrové pole vlivem působení proměnlivého zatížení [1]

Modifikovaný zub má podstatný vliv na výsledné záběrové pole, jehož plocha se proti nemodifikovanému zubu zmenšuje (viz obrázek 8). Z toho důvodu musí být velikost modifikace navržena tak, aby plynulost reálného tvaru zubu při záběru zatíženého soukolí byla co největší a výsledná délka dotyku se co nejvíc blížila teoretické hodnotě. Příliš velká výšková modifikace

způsobí zkrácení součinitele záběru profilu o hodnotu $\Delta \varepsilon_\alpha$ na hlavě i patě zubu. Vyčíslení skutečného součinitele záběru profilu vlivem aplikované modifikace je velmi obtížné.

Obecné doporučení uvádí, aby bylo dosaženo celočíselného záběru, např. $\varepsilon_\alpha = 2$, je vhodné při návrhu ozubeného soukolí tuto hodnotu překročit cca o 5%. Podélná modifikace snižuje součinitel záběru kroku vlivem provedených úprav na boku zubu z šířky záběru b_w na b_e' . Proto je opět vhodné, aby bylo dosaženo celočíselných hodnot součinitele např. $\varepsilon_\beta = 1, 2$ atd., překročit tuto hodnotu přibližně o 10 ÷ 20%.



Obrázek 8: Záběrové pole modifikovaného zubu [1]

4 Metodika měření záběrových poměrů

Celá kapitola vychází z poznatků popsaných v [1], ze kterého jsou v některých případech texty převzaty.

Skutečné záběrové poměry, přesněji skutečná hodnota součinitele trvání záběru profilu ε_α a součinitele trvání záběru krokem ε_β se v praxi dá sledovat mnoha způsoby. Jejich přesnost se odvíjí od způsobu zvolené metody zkoušení, která úzce souvisí s časovou, potažmo finanční náročností.

Nejúčinnějším a zároveň nejzdlouhavějším způsobem ověřování vlivu provedených modifikací na záběrové vlastnosti je sledování provozu modifikovaného soukolí v provozu. I provedení zrychlené formy této životnostní zkoušky je stále časově náročné.

Dalším možným způsobem jak ověřit správnost provedených modifikací je měření vibrací nebo hluku během vybraných provozních režimů. Tento způsob testování však vyžaduje perfektní znalosti a zkušenosti v tomto oboru. Zároveň je potřeba finančně náročný software a hardware pro vyhodnocení výsledků.

Nejjednodušším způsobem je hodnocení záběru modifikovaných ozubených kol pomocí sledování otisku spoluzabírajících boků zubů. Předpis minimální plochy dotyku uvádí norma [7], ta stanovuje závislost stupně přesnosti na relativních rozměrech celkového pásma dotyku v procentech. Její hodnoty jsou názorně uvedeny v následující tabulce (tabulka 2).

Tabulka 2: Předpis relativního pásma dotyku spoluzabírajících zubů [7]

Stupeň přesnosti	Relativní rozměry celkového pásma dotyku v procentech	
	na výšku zubů nejméně	na délku zubů nejméně
3	65	95
4	60	90
5	55	80
6	50	70
7	45	60
8	40	50
9	30	40
10	25	30
11	20	25

4.1 Identifikační povlaky

Sledování otisků spoluzabírajících boků zubů se začalo využívat při ustavování záběru kuželových a šnekových soukolí pomocí identifikační barvy, kdy při záběru soukolí došlo k setření nanesené vrstvy barvy. Díky tomu bylo možné doladit ustavení spoluzabírajících kol do ideální polohy. Podobným způsobem se provádí posuzování kvality záběrových poměrů modifikovaných ozubených soukolí.

V současné době se tato problematika značně rozvíjí, jelikož za určitých podmínek z ní lze vyčíst mnohem víc než jen správnost záběru ozubeného soukolí. K těmto testům se převážně využívají speciální identifikační barvy. Přesná metodika způsobu nanášení identifikačních barev není v běžně dostupné literatuře jasně stanovena a firmy zabývající se touto problematikou nejsou v tomto směru příliš konkrétní z důvodu ochrany vlastních poznatků a zkušeností.

4.1.1 Povlaky z kovů

Způsob této zkoušky je detailně popsán ve výzkumné zprávě [5], která se zabývala ověřením dotyku zubů v převodovce s čelním soukolím se šikmými zuby. Z této zprávy je zde ve zkrácené formě popsán způsob provádění této zkoušky včetně výhod a nevýhod.

Metoda spočívá na principu elektrolytického pokovení boků zubů pomocí mědi. Díky vytvořené vrstvě mědi na bocích zubů dojde při následném záběru soukolí k vyleštění této vrstvy na spoluzabírajících plochách, ze kterých se následně odečtou potřebné parametry.

Než dojde k pomědění soukolí, musí nejprve dojít ke změření tvaru modifikací a veškerých úchylek tvarů boků zubů. Následně se ozubené soukolí elektrolyticky pomědí a je zapotřebí, aby na povrchu kola vznikla vrstva mědi o tloušťce $4 \div 8 \mu\text{m}$. Při menší tloušťce dochází ke špatné čitelnosti otisku, naopak při větší tloušťce dochází k zadírání soukolí a odlupování poměděné vrstvy. U soukolí dosahujících větších rozměrů je možné pomědit jen menší pastorek. Takto připravené zkušební soukolí se namontuje do převodové skříně. Zkouška se provádí na testovacím zařízení, které je schopné zatížit soukolí dle požadavků. Je nutné, aby tento test probíhal bez olejové náplně.

Doba zkoušky je závislá na velikosti zatížení a rychlosti otáčení během zkoušení. Dalšími ovlivňujícími faktory jsou drsnosti povrchu poměděných boků zubů (případně nepoměděného spoluzabírajícího kola) a tloušťka nanesené vrstvy mědi. Z pravidla k realizaci otisku dochází během desítek až stovek pootočení. V případě, že je možné sledovat vznik otisku během zkoušky, dojde k ukončení zkoušky při vzniku zřetelného otisku, který následně půjde bez problémů vyhodnotit. Vzniklý otisk na následujícím obrázku (obrázek 9) vyhodnocujeme dle poznatků uvedených v následující podkapitole 4.2.

Výhody:

- Tloušťka poměděné vrstvy dosahuje minimální hodnoty a je rozložena po všech bocích zubů téměř v konstantní tloušťce.
- Měděná vrstva dosahuje určité pevnosti, takže výsledný otisk vzniká jen v místech kvalitního záběru.

Nevýhody:

- Časová náročnost.
- Složitost zkoušky.
- Vzniklé otisky jsou spektakulární, jelikož k jejich vytvoření dochází při záběru s velkým počtem ne zcela identických zubů, které mohou ovlivňovat výslednou plochu otisku vytvořeného na boku zubu.
- Výsledná plocha otisku má nejasně určené hranice konce dotyku zubů.
- Vrstva mědi dosahuje určité pevnosti a k jejímu vyleštění dochází až od určitých měrných tlaků.
- Zkoušku nelze opakovat na stejném soukolí.



Obrázek 9: Výsledek zkoušky s kovovým identifikačním povlakem [5]

4.1.2 Identifikační barvy

Způsob této zkoušky byl naznačen průmyslovým partnerem, který z důvodu ochrany svých vlastních poznatků nebyl v tomto ohledu příliš konkrétní. Uvedený obecný popis této metody je zároveň doplněn o vlastní postřehy nabyté při praktických zkouškách měření otisků.

Metoda spočívá na principu nanesení speciální identifikační barvy na boky zubů. Následně dojde k setření této vrstvy při dotyku zubů během záběru. Ze vzniklých otisků se následně odečtou potřebné parametry.

Před započítáním zkoušky je zapotřebí do převodové skříně vyrobít otvor v takovém místě, aby bylo možné na povrch boku zubu nanést vrstvu identifikační barvy a zároveň skrze tento otvor vzniklý otisk vyhodnotit. Po zhotovení otvoru se na několik boků zubů nanese tenká

vrstva identifikační barvy, která má v ideálním případě konstantní tloušťku po celé šířce zubu. Barva se nanáší pouze na jedno ze spoluzabírajících kol. Následně se testované soukolí zatíží silou dle požadavků. Je nutné, aby tento test probíhal bez olejové náplně.

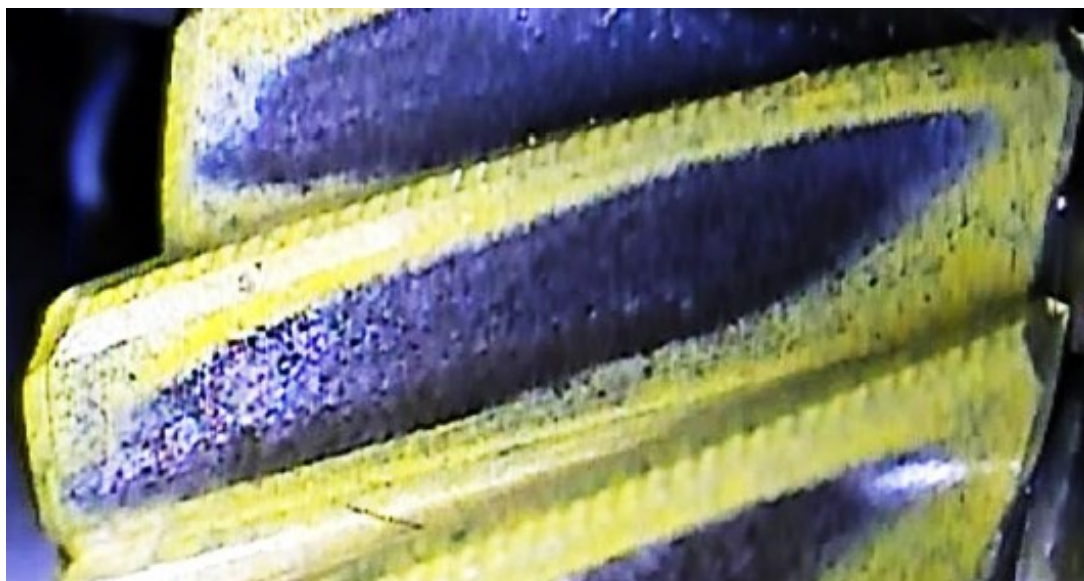
Doba zkoušky je velice krátká, výsledný otisk je zhotoven během pootočení v řádu maximálně několika otáček. Vzniklý otisk na následujícím obrázku (obrázek 10) vyhodnocujeme dle poznatků uvedených v následující kapitole 4.2.

Výhody:

- Rychlost a jednoduchost nanesení barvy na boky zubů, rovněž zkouška je velice rychlá.
- Barvu lze ze zubu jednoduše odstranit a zkoušku opakovat.
- Při vytváření otisků během jednoho pootočení není výsledná plocha stěru ovlivněna větším počtem ne zcela identických zubů.
- Zkoušku lze opakovat na jednom zubu se stejným spoluzabírajícím zubem při měnícím se zatížení v průběhu opakování, můžeme tak sledovat průběh měnící se plochy dotyku vzhledem ke vzrůstající zatěžující síle.

Nevýhody:

- Vlivem vyrobeného otvoru v těle převodové skříně dochází k její ztrátě tuhosti.
- Nutná manuální zručnost při nanášení tenké a stejnoměrné vrstvy identifikační barvy na povrch boku zubu.
- Při častém opakování zkoušky na stejném soukolí dochází k vyhlazování boku zubu a vzniku viditelných stop od zatěžování, na kterých může nanesená barva špatně držet, případně i stékat.



Obrázek 10: Výsledek zkoušky s identifikační barvou

4.2 Rozbor kvality otisku

Vzniklý otisk na boku zubu lze rozdělit podle sledovaných kritérií do několika tříd. Z výsledného otisku se může vyčíst, zda vyrobené soukolí podle teoretických předpokladů splňuje pod určitým zatížením v reálném provozu podmínku správného záběru. To znamená, aby velikost plochy dotyku spoluzabírající šířky ozubeného soukolí odpovídala hodnotám předepsaných výpočtem, případně hodnotám udávaných v normě [7]. Jedná se tedy o kontrolu zjišťující správnost provedených modifikací.

Poznatky uvedené v této kapitole lze velice snadno aplikovat u sériové výroby. Nejprve dojde na zkušební převodovce k otestování záběrových poměrů a je-li to nutné, tak podle zjištěných údajů soukolí upravit takovým způsobem, aby záběr byl odpovídající a soukolí se mohlo produkčně vyrábět.

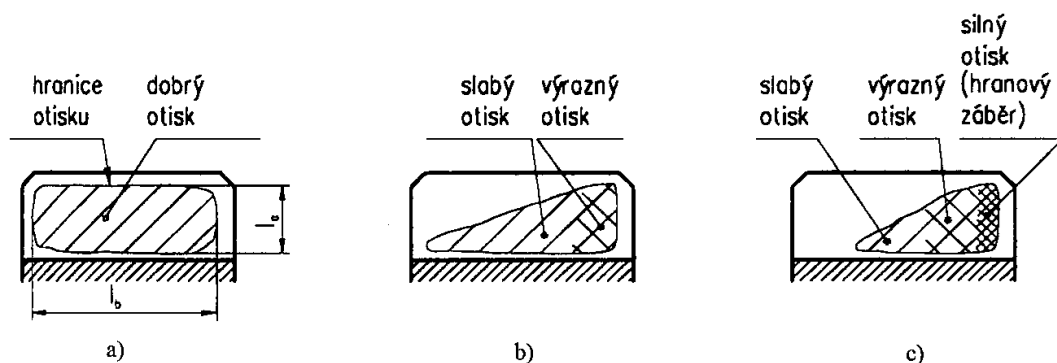
4.2.1 Intenzita otisku, velikost hranového záběru

Míra intenzity otisku závisí na velikosti zatěžující síly ozubeného soukolí. Jak již bylo popsáno v kapitole 3.3, výšková a podélná modifikace se provádí jen pro určitou hodnotu, kterou bude soukolí zatěžováno. Je tedy zřejmé, že při nedodržení této zatěžující síly bude výsledné záběrové pole odlišné od teoretického předpokladu.

Obrázek 11 a) zobrazuje ideální vzhled otisku při záběru soukolí. Plocha záběrového profilu se nachází takřka po celé šířce dotyku spoluzabírajících zubů. Zároveň i intenzita otlaku je po celé ploše konstantní. Otisk s těmito vlastnostmi potvrzuje správnost provedených modifikací při dané síle zatěžování, kdy dochází k rovnoměrnému rozložení sil po celé šířce a výšce boku zubu.

Obrázek 11 b) zobrazuje otisk, který vzniká za předpokladu zatížení soukolí buď silou nižší, než na jakou byl zub modifikován (po dosažení požadované zkušební síly bude mít záběrové pole optimální vzhled), nebo silou větší. Vnikne-li takový otisk při síle, na kterou byl zub navržen, lze jej považovat za limitní, splňuje-li minimální plochu dotyku dle normy [7]. Intenzita otlaku již není po celé ploše konstantní, ale dochází k její změně podél šířky dotyku spoluzabírajících zubů. Otisk s těmito vlastnostmi nerovnoměrně zatěžuje zub a díky tomu dochází k nárůstu hodnot u vibrací a hluku.

Obrázek 11 c) zobrazuje nežádoucí vzhled otisku, jde tzv. hranový záběr, který je pro soukolí naprosto nevyhovující. K tomuto stavu může docházet, je-li soukolí provozováno bez zatížení. V tomto případě může být hranový záběr přípustný, jelikož po dosažení zatěžující síly dojde vlivem deformací k optimálnímu záběru. Hranový záběr může nastat, pokud je soukolí značně přetíženo. Dochází-li však k tomuto stavu během zatěžující síly, na kterou byl zub navržen, jde o nepřipustnou situaci a soukolí musí být navrženo znovu s ohledem na poznatky nabyté během této zkoušky. Hranový záběr má velký vliv nejen na životnost a únosnost soukolí, ale hlavně na nárůst vibrací a hluku.

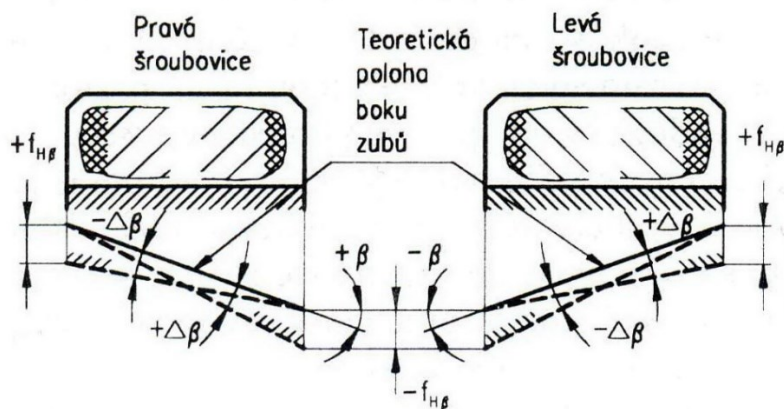


Obrázek 11: Intenzita otisku na boční ploše zubu [1]

4.2.2 Orientace otisku z hlediska chyby šroubovice

Dochází-li ke vzniku otisku, který je sice vytvořen po celé výšce dotyku spoluzabírajících zubů, ale již ne po celé šířce, je na vině špatná úchylka sklonu zubu $f_{H\beta}$. V takovém případě dochází k nerovnoměrnému rozložení zatěžující síly podél boku zubu, jejíž maximální hodnota se nachází vždy na okraji boku zubu. Tento stav je dán chybou výroby nebo deformací hřídelů a ozubených kol. Na následujícím obrázku (obrázek 12) je schematicky vyobrazeno působení této úchylky na boku zubu jak pro pravou, tak levou šroubovici.

Vznikne-li takový otisk při působícím zatížení, na které byl zub navržen, jedná se o nepřípustnou situaci, je-li plocha dotyku zabírajících zubů menší než jakou stanovuje norma [7]. Zub je nadměrně zatěžován na svém okraji, jelikož dochází k nerovnoměrnému rozložení zatížení. To má za následek snížení životnosti ozubení a zároveň zvýšení hladiny vibrací a hluku. Proto je potřeba upravit modifikaci zubu takovým způsobem, aby docházelo k dosednutí celého záběrového pole spoluzabírajících zubů. Potřebná úprava úchylky sklonu zubu $f_{H\beta}$ v závislosti na poloze otisku je vyobrazena na obrázku níže (obrázek 12). K takovému otisku rovněž dochází u přetížení ozubeného soukolí nebo naopak při zatížení silou menší než pro kterou byl zub navržen.

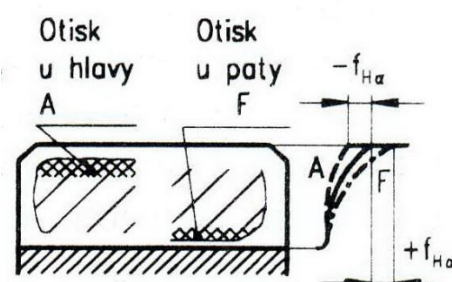


Obrázek 12: Orientace otisku z hlediska chyby šroubovice [1]

4.2.3 Orientace otisku z hlediska chyby úhlu záběru

Vzniklý otisk je obdobou otisku popsaného v předchozí podkapitole, jen jeho orientace je pootočená o 90° . Z toho vyplývá, že otisk je vytvořen po celé šířce dotyku spoluzabírajících zubů, ale již ne po celé výšce. K výraznému záběru tedy dochází buď na hlavě, anebo na patě zubu. Na vině je špatná úchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$, díky které dochází k nerovnoměrnému rozložení zatížení (viz obrázek 13). To má za následek snížení životnosti ozubení a zároveň zvýšení hladiny vibrací a hluku. Otisk může být maximální na hlavě zubu a směrem k patě se bude zmenšovat při $-f_{H\alpha}$, kdy úhel záběru je menší. Nebo může být maximální na patě zubu a směrem k hlavě se může zmenšovat při $+f_{H\alpha}$, kdy úhel záběru je větší než teoretický. U tohoto typu otisku je více než jasné, že silně závisí na součiniteli trvání záběru ε_α potažmo tuhosti ozubení c.

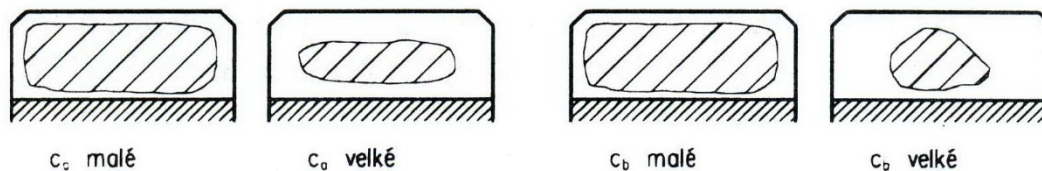
Je zřejmé, že otisk bude opět ovlivňován velikostí zatěžující síly. Dojde-li ke vzniku takového otisku při působícím zatížení, na které byl zub navržen a jeho plocha dotyku neodpovídá hodnotám předepsaných v normě [7], je zapotřebí upravit modifikaci takovým způsobem, aby došlo k rozložení zatěžující síly po celém záběrovém poli. Chyba úhlu záběru podstatně ovlivňuje velikost součinitele ε_α , jehož charakteristické vlastnosti jsou popsány v podkapitole 2.1.



Obrázek 13: Orientace otisku z hlediska chyby úhlu záběru [1]

4.2.4 Orientace otisku z hlediska velikosti modifikace

Velikost provedené výškové modifikace c_a a podélné modifikace c_b má zásadní vliv na celkovou plochu otisku spoluzabírajících zubů, tento fakt již byl zmíněn v podkapitole 3.4. Na následujícím obrázku (obrázek 14) je schematicky vyobrazeno jakým způsobem se podílí malá a velká modifikace c_a a c_b na výslednou velikost plochy otisku z hlediska své orientace podél výšky a šířky zubu. Z obrázků je patrné, že při zvětšující se c_a dochází ke zmenšování záběrové plochy na výšce zubu. A při zvětšující se c_b dochází ke zmenšování záběrové plochy podél šířky zubu.



Obrázek 14: Orientace otisku z hlediska velikosti modifikace [1]

4.3 Popis metodiky získávání otisků dle požadavků průmyslového partnera

Požadavek průmyslového partnera je na rychlost provedení a vyhodnocení zkoušky s možností opakování celého procesu na stejném soukolí při různých krouticích momentech. Nelze tedy použít typ zkoušky využívající vytvoření povlaku na zubu pokovením.

Práce probíhala na zkušebním soukolí v převodovce, kterou poskytl průmyslový partner. Převodovka má upravenou skříň ve smyslu, že jsou v ní na patřičných místech vyřezány otvory pro možnost nanášení identifikační barvy a následné pořizování fotografií vzniklých otisků k vyhodnocování. Převodovka byla umístěna ve zkušebním zařízení, které vzniklo v rámci Centra kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka. Podrobný popis zařízení je uveden v následující kapitole 5.

4.3.1 Příprava povrchu zubů

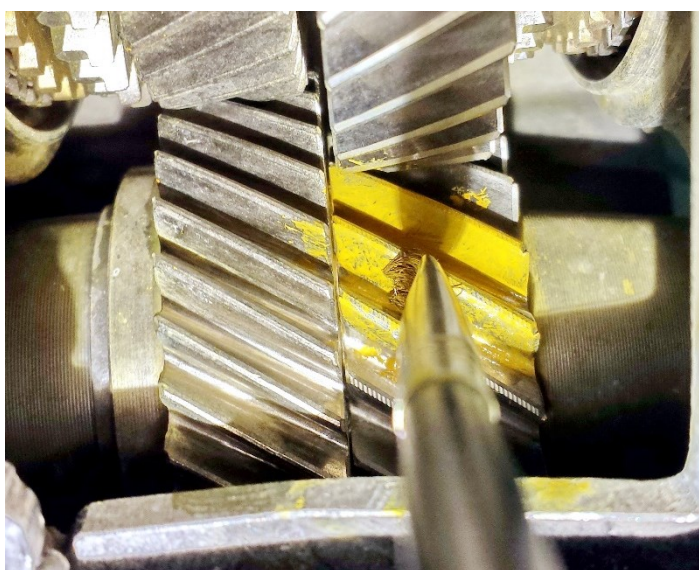
Před započítím zkoušky je nutné povrch zubů testovaného soukolí důkladně očistit a odmastit. Tento proces je potřebný k tomu, aby nesená vrstva barvy nebyla ovlivněna žádným faktorem. K čištění se používají běžně dostupná ředidla či rozpouštědla, které zaručí dokonalé odstranění všech nečistot z povrchu zubů. Zároveň musejí být založeny na takové bázi, aby nenarušily povrchovou strukturu zubů vlivem působení chemických látek. Čisticí prostředky lze aplikovat buď pomocí štětce, který zaručí důkladné omytí boků zubů díky působení štětin a chemického procesu (viz obrázek 15). Nebo pomocí sprejového rozstřiku čisticí látky, která nečistoty smyje. Po dokončení čisticí operace se musí soukolí důkladně vysušit. Proces sušení lze urychlit např. fénem. Při nedostatečném vysušení by mohlo dojít k rozředění identifikační barvy, které by následně znehodnotilo výsledek zkoušky. Takto ošetřený povrch zubu bez zjevných známek znečištění je připraven k aplikaci identifikační barvy.



Obrázek 15: Příprava povrchu ozubení pro nanesení identifikační barvy

4.3.2 Aplikace identifikační barvy

Správná aplikace identifikační barvy je stěžejním krokem pro provádění otisku, který bude co nejdůvěryhodněji interpretovat dění při záběru ozubeného soukolí. Identifikační barvu nanášíme na očištěný povrch boční plochy zubu pomocí štětce takovým způsobem, aby vznikla v ideálním případě tenká, jednolitá vrstva (viz obrázek 16). Právě tenká vrstva zaručí, že výsledný otisk bude nejdůvěryhodněji odpovídat se skutečným záběrem soukolí. Jakákoli nerovnoměrnost v nanesené vrstvě způsobí zkreslení skutečného záběru. Dále nanesená vrstva barvy nesmí obsahovat povrchové vady, jako jsou hrudky, kapky, vzduchové bubliny, výrazné tahy štětcem a nedotřené místa. Barvu nanášíme jen na jedno kolo z testovaného soukolí na libovolný počet zubů.



Obrázek 16: Nanášení identifikační barvy pomocí štětce

4.3.3 Zhotovení otisku

Zkušební zařízení nastavíme tak, aby bylo schopné vytvořit otisk při požadovaném krouticím momentu v rozsahu $0 \div 100 \text{ N}\cdot\text{m}$. Otisk v nanesené vrstvě identifikační barvy (viz obrázek 17) je potřeba zhotovit během jednoho pootočení. Tento požadavek se výrazně odlišuje od doposud zavedené praxe, kdy otisk vzniká během blíže nespecifikovaného počtu pootočení. Klade tak náročné požadavky na zkušební zařízení, které musí být schopno vyvinout potřebné otáčky a zatížení během krátké chvíle. Od této podmínky se odvíjí fakt, že otisk vznikne při malých otáčkách testovaného soukolí.



Obrázek 17: Vzhled připravených zubů určených k testování

4.3.4 Vyfotografování vzniklého otisku k následnému rozboru

Vzniklý otisk (viz obrázek 18) nelze vyhodnotit pouze vizuálně, jak tomu bývávalo u usazování kuželových soukolí. Je zapotřebí vytvořit snímek zubu v takové obrazové kvalitě, aby byl otisk ze snímku snadno čitelný. To znamená, že snímaný zub musí být dobře nasvícený bez rušivých stínů a odlesků, rovněž soukolí musí být v takové poloze, aby zhotovený otisk nezakrýval jiný zub. Výsledný snímek musí být pořízen v co nejvyšším obrazovém rozlišení a ostrosti. Zároveň optické zařízení nesmí být příliš velké z hlediska omezenému přístupu k ozubenému soukolí a velikosti vytvořeného otvoru v převodové skříni. Dále je důležité, aby zhotovený snímek neobsahoval obrazovou deformaci a zkreslení, které by negativně ovlivnily jeho velikost a tvar.

Díky těmto podmínkám získáme fotografii otisku, ze které bude výsledné odměřování potřebných rozměrů velice přesné.



Obrázek 18: Vzhled vzniklého otisku

4.3.5 Čištění soukolí od identifikační barvy

Po dokončení zkoušky a získání všech potřebných údajů je potřeba z testovaného soukolí identifikační barvu odstranit. K čištění používáme vhodné rozpouštědlo určené pro konkrétně užitou identifikační barvu. Chemické složení rozpouštědla musí být opět takové, aby nenarušilo strukturu povrchu zubu. Barvu smýváme pomocí navlhčeného štětce v daném rozpouštědle, kdy provedeme několik tahů po boční ploše zubu (viz obrázek 19). Štětec během stírání do sebe nasaje rozpuštěnou barvu, proto se nesmí zapomenout na pravidelné vymývání, abychom zamezili nadbytečnému rozmazávání barvy po okolí. Čištění provádíme tak dlouho, až dojde k úplnému odstranění identifikační barvy. Po dokončení této operace musí dojít k vysušení soukolí, aby nedošlo ke kontaminaci rozpouštědla a identifikační barvy při opakování zkoušky.

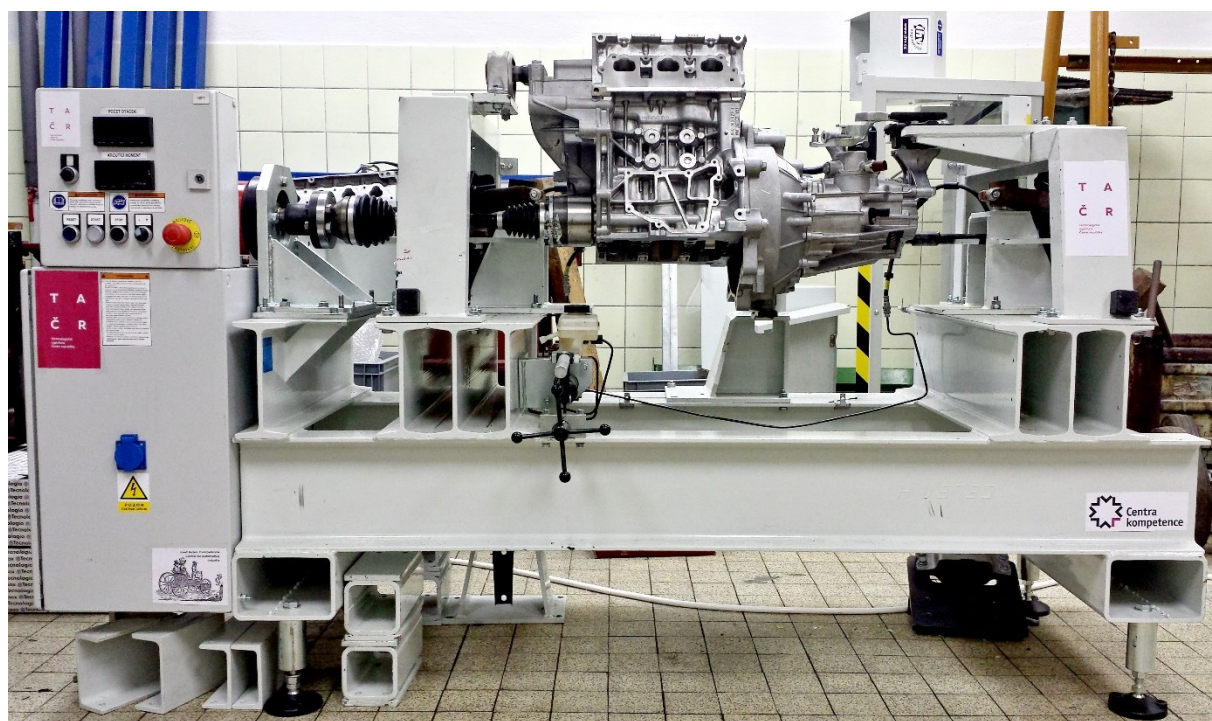


Obrázek 19: Čištění ozubení od identifikační barvy

5 Koncept zkušebního zařízení

Zkušební zařízení vzniklo za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu Centra kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka. Prvotní využití tohoto zařízení bylo pro kontrolu průhybů hřídelů. Lze jej však využít i k provádění experimentů s měřením otisků. Jeho konstrukce včetně připojené zkušební převodovky je vyobrazena na následujícím obrázku (obrázek 20).

Jedná se o otevřený zkušební okruh, na kterém lze velice snadno a rychle měnit potřebné momentové zatížení pomocí dvou kotoučových brzd. Konstrukce rámu je tvořena pomocí běžně dostupných normalizovaných profilů. Hlavní rám je zhotoven ve formě svařence, k němu jsou připevněny pomocí šroubů doplňkové příruby pro možnost uchycení zkušebního zařízení např. hnacího elektromotoru, zkušební převodovky, brzd, atd.



Obrázek 20: Zkušební zařízení

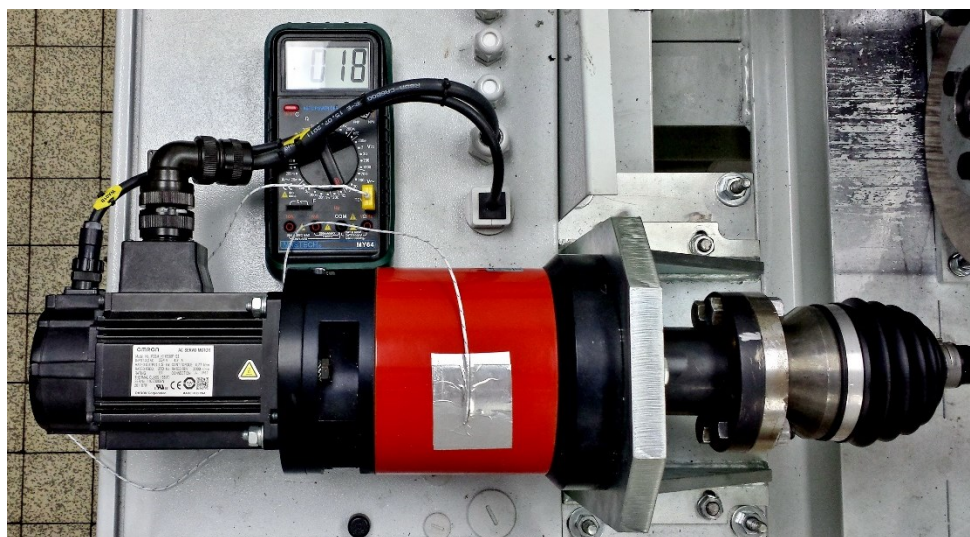
5.1 Vyvozování zatížení na zkušebním zařízení

Tato podkapitola podrobněji popisuje nejdůležitější části zkušebního zařízení včetně jejich charakteristických vlastností, které mají vliv na průběh zkoušky.

5.1.1 Elektromotor

Zkušební zařízení pohání servomotor (viz obrázek 21) s frekvenčním měničem, který v reálném čase ukazuje aktuální počet otáček a potřebný krouticí moment potřebný k pohonu hnacího hřídele v převodovce (viz obrázek 22). Díky frekvenčnímu měniči si lze na kontrolním panelu navolit ideální otáčky potřebné k provedení zkoušky. Otáčky nejsou v průběhu

testování ovlivňovány kolísáním brzdného odporu a jsou tedy po celou dobu konstantní. Lze je nastavit v rozsahu $0 \div 40 \text{ min}^{-1}$, tento rozsah je plně dostačující pro získání otisku během jednoho pootočení hnacího hřídele s ozubeným kolem.



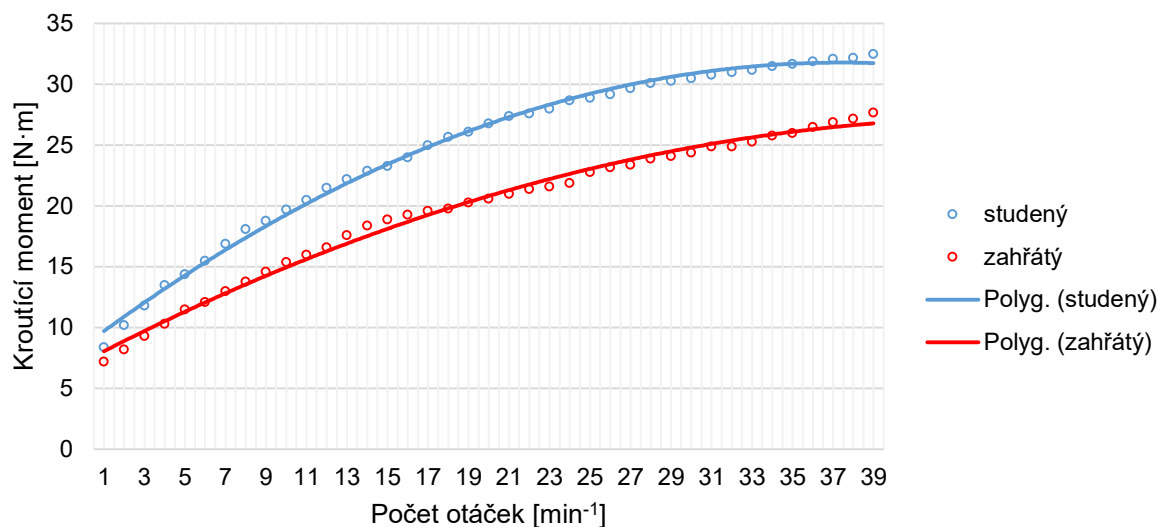
Obrázek 21: Servomotor s planetovou převodovkou



Obrázek 22: Kontrolní panel

Součástí servomotoru je planetová převodovka. Ta redukuje otáčky a násobí krouticí moment servomotoru. Zde vstupuje do zobrazované hodnoty krouticího momentu v aktuálním čase nepřesnost ve formě momentového odporu planetového převodu, protože je snímán v servomotoru a ne na hnacím hřídeli převodovky. Jeho průběh v závislosti na otáčkách je zobrazen na následujícím grafu (obrázek 23) a je ovlivněn provozní teplotou. Ve studeném stavu má převod větší odpor než v zahřátém. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce na CD disku v příloze pod označením Data_servomotor.xlsx.

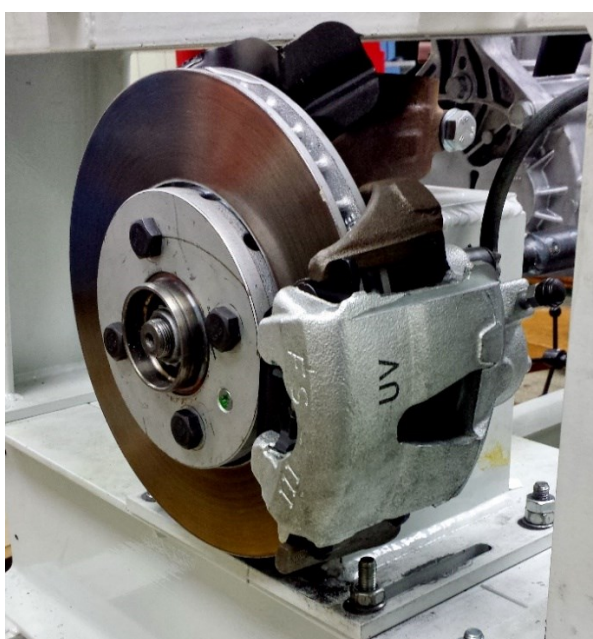
Momentový odpor elektromotoru



Obrázek 23: Změna krouticího momentu v závislosti na zahřátí servomotoru

5.1.2 Brzdný odpor

Brzdění převodovky zajišťují dvě kotoučové brzdy (viz obrázek 24) připojené k diferenciálu. Díky plynule nastavitelné brzdné síle lze dosáhnout libovolně velkého brzdného odporu. Ten vytváří požadovaný krouticí moment na testovaném soukolí v převodovce. Brzdný odpor je během zkoušky konstantní, trvá-li do cca 20 sekund. Pak nastává pozvolný pokles zejména vlivem ohřevu brzdových destiček. Jakákoli nepřesnost, ve smyslu poklesu brzdné síly, se okamžitě projeví na snímači krouticího momentu. Tento způsob brzdění umožňuje vyvinout na testovaném soukolí v převodovce krouticí moment v libovolném rozsahu.



Obrázek 24: Kotoučová brzda zkušebního zařízení

5.2 Způsoby vytvoření snímků otisků k vyhodnocení

Tento experiment byl proveden na základě vytipování vhodného přístroje s optickým záznamem. Vzniklé fotografie se používají k vyhodnocování vytvořených otisků. Daný problém je komplikován tím, že je potřeba snímat obraz z převodové skříně skrze malé otvory.

5.2.1 CCTV minikamera

Vlastnosti:

CCTV minikamera (viz obrázek 25) je schopna pořizovat videozáznam v běžném PAL standardu 768 x 576 px. Snímaný obraz je pomocí televizní karty přenášen do PC. Kamera nedisponuje žádnými přisvětlovacími LED diodami, je-li to nutné, musí se snímané místo přisvětlit externím zdrojem světla. Obrazový snímač má rozměry 13 x 13 x 10 mm a dle těchto rozměrů je zapotřebí vyrobit minimální velikost otvoru v převodové skříně.



Obrázek 25: CCTV kamera [10]

Ukázková fotografie pořízená tímto přístrojem je zobrazena na následujícím obrázku (obrázek 26). Z fotografie je patrné, že kvalita obrazu je na dobré úrovni. Otisk je zřetelně viditelný včetně veškerých obrazových detailů potřebných k vyhodnocení. Fotografie lze do jisté míry zvětšovat, aniž by docházelo ke značnému rozmazávání obrazu. Tento přístroj je pro hodnocení otisku vyhovující.



Obrázek 26: Snímek pořízený CCTV kamerou

Výhody:

- Poměrně malé rozměry optického snímače.
- Dobrá obrazová kvalita s velkou hloubkou ostrosti.
- Fotografie otisku má potřebné detaily k následnému vyhodnocení.
- V převodové skříně není nutné vytvářet velký otvor, který by zásadně ovlivnil její tuhost.

Nevýhody:

- Nutná potřeba televizní karty pro převod analogového signálu na digitální.
- Zařízení nemá integrované osvětlení.

5.2.2 Endoskop Voltcraft

Vlastnosti:

Endoskop Voltcraft BS-300XWIFI (viz obrázek 27) je schopen pořizovat snímky na těžko přístupných místech díky svému flexibilnímu husímu krku, na jehož konci je optický snímač. Snadno ohybatelnou sondu lze nastavit do ideální polohy vůči snímanému zubu pro vytvoření co nejméně zkreslené fotografie otisku. Endoskop má u optického snímače integrované dvě LED diody bílé barvy pro osvětlení snímaného místa. Intenzitu osvětlení lze plynule regulovat. Obraz se přenáší pomocí Wi-Fi signálu do mobilního zařízení, kde se zároveň ukládají pořízené fotografie. Optický snímač má rozlišení 640 x 480 px. Průměr sondy je 9,8 mm, díky tomu není potřeba vyrábět velký otvor v převodové skříně a nedojde tak k zásadnímu ovlivnění její tuhosti.



Obrázek 27: Endoskop Voltcraft

Ukázková fotografie pořízená tímto přístrojem je zobrazena na následujícím obrázku (obrázek 28). Z fotografie je patrné, že kvalita obrazového snímače není dobrá. Otisk je sice

zřetelně vidět, nicméně neobsahuje veškeré obrazové detaily potřebné k vyhodnocení. Zároveň fotografii kvůli nízkému obrazovému rozlišení již nelze víc zvětšovat, protože dochází ke značnému rozmazávání obrazu. Tento přístroj z hlediska hodnocení otisku není vhodný.



Obrázek 28: Snímek pořízený endoskopem Voltcraft

Výhody:

- Malý průměr sondy s optickým čipem.
- Možnost přisvětlení snímané plochy integrovaným osvětlením s plynulou regulací.
- V převodové skříni není nutné vytvářet velký otvor, který by zásadně ovlivnil její tuhost.

Nevýhody:

- Špatná obrazová kvalita.
- Nízké rozlišení výsledné fotografie.
- Na fotografii nejsou zřetelné obrazové detaily.

5.2.3 Endoskop SKF

Vlastnosti:

Endoskop SKF TKES 1 (viz obrázek 29) má velice podobné vlastnosti jako výše zmíněný endoskop Voltcraft. Jeho husí krk se sondou má větší pružnost, díky tomu ho lze snadněji a rychleji nastavit do ideální polohy vůči snímanému zubu, tak aby vytvořená fotografie otisku byla co nejméně zkreslená. Endoskop má rovněž u optického snímače integrované dvě LED diody bílé barvy pro osvětlení snímaného místa. Ty však mají velmi malé rozměry, a přesto že nabízejí možnost plynulé regulace, tak jejich svítivost je velmi nízká. Obraz se přenáší přímo na displej zařízení, ve kterém se zároveň ukládají pořízené fotografie. Optický CMOS snímač je schopen pořizovat fotografie v rozlišení 640 x 480 px. Průměr sondy je pouze 5,5 mm, což sice přináší výhodu ve formě velmi malého otvoru v převodové skříni, ale tento rozměr je již nedostačující pro možnost skrze něj aplikovat vrstvu identifikační barvy.



Obrázek 29: Endoskop SKF

Ukázková fotografie pořízená tímto přístrojem je zobrazena na následujícím obrázku (obrázek 30). Z fotografie je patrné, že kvalita obrazového snímáče je velmi špatná. Otisk lze na fotografii vidět, nicméně výsledná kvalita je nevhodná k objektivnímu vyhodnocení. Zároveň fotografii kvůli nízkému obrazovému rozlišení již nelze víc zvětšovat, protože dochází ke značnému rozmazávání obrazu. Tento přístroj je z hlediska hodnocení otisku nevhodný.



Obrázek 30: Snímek pořízený endoskopem SKF

Výhody:

- Velice malý průměr sondy s optickým čipem.
- Možnost přisvětlení snímané plochy integrovaným osvětlením s plynulou regulací.
- V převodové skříni není nutné vytvářet velký otvor, který by zásadně ovlivnil její tuhost.

Nevýhody:

- Špatná obrazová kvalita.
- Nízké rozlišení výsledné fotografie.
- Na fotografii nejsou zřetelné obrazové detaily.

5.2.4 Mikroskop dnt

Vlastnosti:

Mikroskopová kamera dnt DigiMicro Profi (viz obrázek 31) je schopná pořizovat velice detailní snímky díky rozlišení snímacího čipu o hodnotě 5 Mpx. Mikroskop je vybaven osmi LED diodami, které jsou umístěny v kruhovém uspořádání kolem snímacího čipu. Intenzitu osvětlení lze plynule regulovat. Obraz je přenášen do PC pomocí USB portu. Průměr tubusu zařízení je 35 mm a je neohebný. Z tohoto důvodu musí být v převodové skříni zhotoven větší otvor, aby bylo možné mikroskop správně ustavit. Může tak dojít k ovlivnění tuhosti převodové skříně. Ohnisková vzdálenost přístroje je od 100 mm až po nekonečno. Ostření obrazu se provádí manuálně pomocí prstence umístěného na těle zařízení. Přístroj disponuje relativně malou hloubkou ostrosti.



Obrázek 31: Mikroskopová kamera ndt

Ukázková fotografie pořízená tímto přístrojem je zobrazena na následujícím obrázku (obrázek 32). Z fotografie je patrné, že kvalita obrazového snímáče je na velmi dobré úrovni. Lze však pozorovat prováděný kompromis na obou bocích zubů, kdy z důvodu malé hloubky ostrosti přístroje jsou tyto konce lehce rozmazány. I přesto je otisk zřetelně viditelný, obsahuje veškeré obrazové detaily potřebné k vyhodnocení. Zároveň fotografii lze díky vysokému obrazovému rozlišení víc zvětšovat, aniž by docházelo ke značnému rozmazávání obrazu. Tento přístroj je z hlediska hodnocení otisku vhodný.



Obrázek 32: Snímek pořízený mikroskopovou kamerou ndt

Výhody:

- Kvalita obrazového snímáče je na velmi dobré úrovni.
- Vysoké rozlišení výsledné fotografie se zřetelnými detaily.
- Možnost přisvětlení snímané plochy integrovaným osvětlením s plynulou regulací.
- LED diody jsou v kruhovém uspořádání umístěny kolem obrazového snímáče.

Nevýhody:

- Tubus těla přístroje má velký průměr.
- Malá hloubka ostroty.
- V převodové skříni je nutné vytvořit velký otvor, který může ovlivnit její tuhost.

5.3 Dílčí závěr

Koncept zkušebního zařízení je založen na principu otevřeného okruhu s vyvozováním momentového odporu pomocí dvou kotoučových brzd. To sice přináší výhodu ve formě velice rychlé změny odporového momentu, ale při déle trvající zkoušce může dojít k jeho kolísání. Na rozdíl od uzavřeného zkušebního okruhu, kde je zatěžující moment pevně přednastaven a nedochází k jeho kolísání. Nicméně z hlediska požadavku na rychlost vyhotovení zkoušky a možnosti její provádění za různých zatěžujících podmínek je vhodnější zařízení s otevřeným okruhem.

Za nejvhodnější zařízení s optickým záznamem byl zvolen mikroskop ndt, i přesto že je v převodové skříni potřeba zhotovit větší otvor než u endoskopových přístrojů, který výrazněji ovlivní její tuhost. Ovšem výsledná obrazová kvalita tohoto zařízení je daleko důležitější, protože je dosaženo větší přesnosti při vyhodnocování otisků. Zároveň zhotovené fotografie neobsahují žádné nežádoucí deformace obrazu. Přístroj disponuje možností kvalitního přisvětlení snímaného místa. Z těchto důvodů je nepřípustné použití přístroje s nízkou obrazovou kvalitou, byť disponuje velice malými rozměry.

6 Nejvhodnější druh nátěrové hmoty a způsob její aplikace

Tento experiment je realizován na základě bližšího poznání chování identifikačních barev při provádění otisků. Barvy byly nanášeny v laboratoři při konstantní teplotě $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a vzdušné vlhkosti $50\% \pm 10\%$. Ke zjišťování nebyl použit urychlovací proces zasychání pomocí fénu z důvodu objektivního porovnání všech variant vytipovaných barev. Otisky vyobrazené na obrázcích nevznikaly při záběru stejných spoluzabírajících zubů a ani při stejném zatěžovacím krouticím momentu z důvodu ověření vlastností během různých zkušebních podmínek.

Referenční barva Gear marking compound:

Jedná se o barvu poskytnutou průmyslovým partnerem (viz obrázek 33), z toho důvodu je brána jako vzorová a veškeré srovnání odzkoušených barev během experimentů podléhá jejím vlastnostem. Zejména pak hodnocení nanesené tloušťky identifikační vrstvy. Vytvořená minimální tloušťka této barvy je brána jako referenční, odzkoušené různé typy barev budou hodnoceny právě na tomto základu stylem větší, menší. Přesnou hodnotu tloušťky nelze vyčíslit z důvodu stálé tekutosti určitých typů identifikačních vrstev.



Obrázek 33: Gear marking compound

Přehled barev pro experiment:

Tušírovací pasty (viz obrázek 34) byly pro tento experiment cíleně vybrány na základě doporučení od odborníků pohybující se v technickém odvětví. Tyto barvy se ve strojírenské praxi používají pro identifikaci nerovností při ručním zaškrabávání kovových ploch, k dosažení ideální rovinnosti. Z těchto důvodů je na tuto pastu kladen velký potenciál využitelnosti pro provádění potřebných otisků. Pastu distribuuje rodinná firma EB color ve vlastním internetovém obchodě. Pro experimenty byly firmou zdarma poskytnuty zkušební vzorky v malém kelímku.



Obrázek 34: Tuširovací pasta

Vodou ředitelná akrylátová barva ACRYLIC (viz obrázek 35) byla pro tento experiment vybraná z toho důvodu, že je založena na vodní bázi. Lze ji pořídit v běžném papírnictví balenou v tubě.



Obrázek 35: Barva Acrylic

Temperové barvy (viz obrázek 36) byly vybrány pro experiment opět z hlediska svého složení založeného na vodní bázi. Barvy byly pořízeny ve více barevných variantách k odzkoušení funkčnosti různých druhů odstínů. Tempery mají vysokou krycí schopnost při minimální vrstvě. Z těchto důvodů byly použity k ověření své využitelnosti. Lze je pořídit v běžném papírnictví balené v tubách.



Obrázek 36: Tempera

Spreje PRIMA a PRISMA (viz obrázek 37) byly vybrány pro experiment z důvodu odzkoušení běžně dostupných rychleschnoucích barev na acetonovém základu. Experimentátoři doporučili jejich volbu v matném provedení pro minimalizaci odlesků od nasvícení snímaného zubu. Barvy byly záměrně vybrány v různých odstínech pro vyzkoušení vytváření kontrastu mezi nanesenou vrstvou barvy a setřenou plochou zubu. Spreje lze pořídit v prodejně s barvy a laky.



Obrázek 37: Barva Prima a Prisma

Olejové barvy (viz obrázek 38) byly vybrány pro tento experiment na základě velice podobné konzistence, aromatu a možnosti pořídit ji ve stejném odstínu vzhledem k referenční barvě. Jedná se o klasické barvy používané v uměleckém malování. Olejové barvy lze pořídit v běžném papírnictví balenou v tubě.



Obrázek 38: Olejová barva

Prášek oxidu titaničitého (viz obrázek 39) byl pro tento experiment doporučen od odborníka pohybující se v technickém odvětví. Bylo doporučeno tento prášek rozpouštět ve vodě, což však přinášelo neuspokojivé výsledky při nanášení tenké vrstvy vzniklé konzistence. Avšak náhodou byl prášek rozpuštěn v technickém lihu, kdy vznikla směs, která se velice snadno aplikovala na povrch zubu a zároveň vytvářela velice tenkou, snadno stíratelnou vrstvu. Tato směs byla následně využita při provádění experimentů.



Obrázek 39: Oxid titaničitý

6.1 Gear marking compound

Druh barvy:

Identifikační žlutá barva, která je založena na olejové bázi.

Vlastnosti:

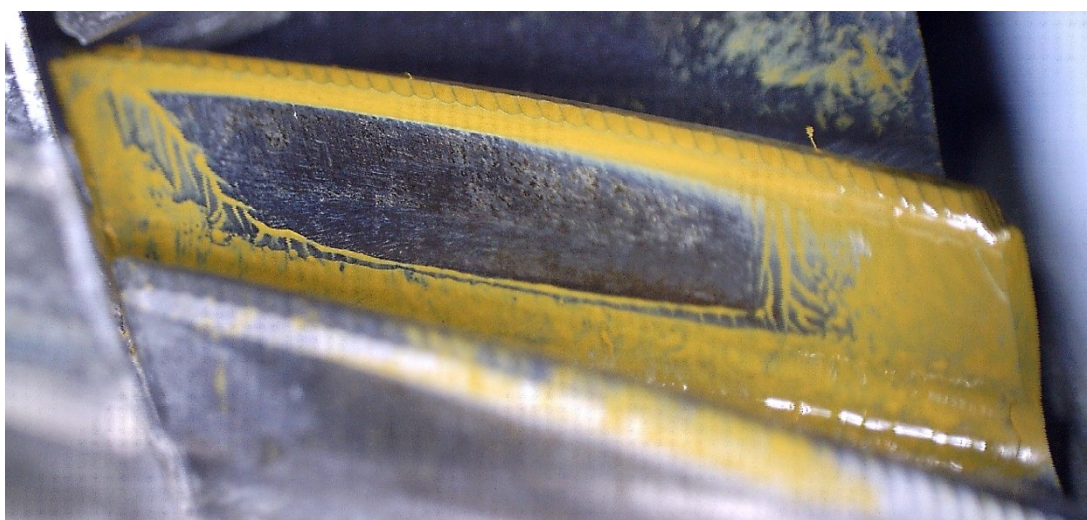
Barva se velice snadno nanáší pomocí štětce. Díky své dlouhodobé stálosti jí lze na povrch boku zubu aplikovat po libovolně dlouhou dobu, dokud nedojde k vytvoření tenké vrstvy o konstantní hodnotě. Barva nezasychá ani v průběhu několika týdnů. Stálá tekutost má za následek, že barva je vtažena zpět na patě zubu směrem k hlavě, dojde-li k vytvoření otisku během jedné otáčky (viz obrázek 40). Její hustá konzistence zajistí, že barva drží na povrchu zubu a nestéká. Tato vlastnost však způsobuje, že po nanesení identifikační vrstvy v ní zůstanou patrné tahy štětcem. K čištění povrchu se používají běžně dostupná rozpouštědla, např. Speciální nitroředidlo C 6000 apod. Smytí identifikační barvy je velice snadné.

Výhody:

- Barva má stálé vlastnosti v dlouhém časovém horizontu – nezasychá.
- Nanosená vrstva drží konstantní tloušťku – nestéká.
- Dobrý kontrast vytvořeného otisku.
- Snadná aplikace a smývání.

Nevýhody:

- Barva je při identifikaci vtažena zpět směrem k hlavě zubu, zkresluje tak výsledný otisk vytvořený během jedné otáčky.
- Nanosená vrstva není jednodušá, obsahuje výrazné tahy štětcem.



Obrázek 40: Vzhled otisku s identifikační barvou Gear marking compound

6.2 Experimentálně odzkoušené barvy

6.2.1 Tuširovací pasta modrá

Druh barvy:

Identifikační modrá tuširovací pasta, která je založena na olejové bázi.

Vlastnosti:

Pasta se poměrně snadně nanáší pomocí štětce. Její vlastnosti jsou velmi podobné jako u referenční barvy Gear marking compound. Pastu lze díky své dlouhodobé stálosti na povrch boku zubu aplikovat po libovolně dlouhou dobu, až dojde k vytvoření tenké vrstvy o konstantní hodnotě. Nanosená tloušťka dosahuje přibližně stejné hodnoty jako u referenční barvy a rovněž nezasychá ani v průběhu několika týdnů. Její velice hustá konzistence zajistí, že drží na povrchu zubu a nestéká. Tato vlastnost však způsobuje, že po nanesení identifikační vrstvy v ní zůstanou výrazné tahy štětcem. Stálá tekutost má za následek, že barva je vtažena zpět na patě zubu směrem k hlavě, dojde-li k vytvoření otisku během jedné otáčky (viz obrázek 41).

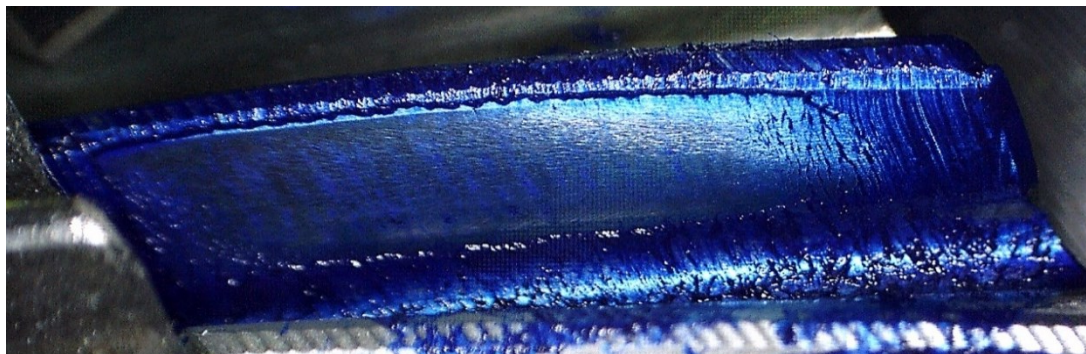
Zároveň modrý odstín nevytváří ideální kontrast pro čitelnost vyhotoveného otisku. K čištění povrchu se používají běžně dostupná rozpouštědla, např. Speciální nitroředidlo C 6000 apod. Smytí identifikační pasty je docela obtížné. Pasta obsahuje velmi intenzivní pigment Berlínská modř, který během smývání i přes značné rozředění stále zanechává modrý nádech zkoušených zubů. Důkladné smytí identifikační barvy trvá v průměru 2 až 3 krát déle než u ostatních experimentálně odzkoušených vzorků.

Výhody:

- Pasta má stálé vlastnosti v dlouhém časovém horizontu – nezasychá.
- Nanesená vrstva drží konstantní tloušťku – nestéká.
- Snadná aplikace.

Nevýhody:

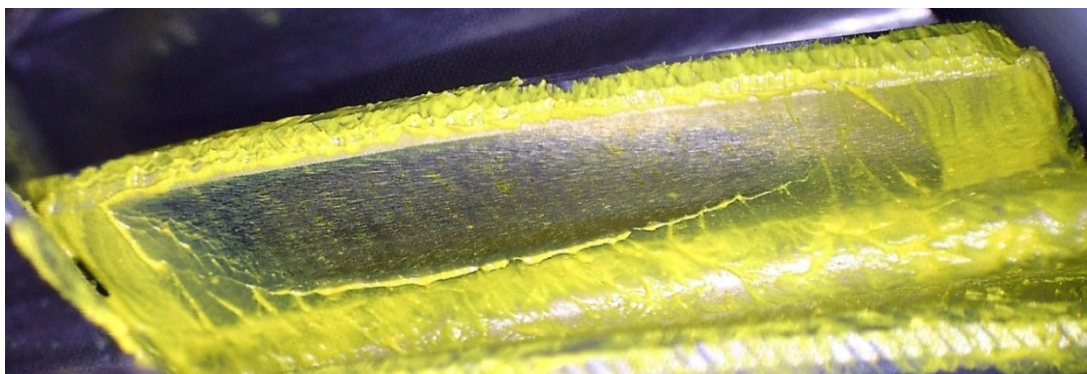
- Špatný kontrast vytvořeného otisku.
- Nanesená vrstva není jednolitá, obsahuje výrazné tahy štětcem.
- Pasta je při identifikaci vtažena zpět směrem k hlavě zubu, zkresluje tak výsledný otisk vytvořený během jedné otáčky.
- Velmi obtížné smývání.



Obrázek 41: Vzhled otisku s identifikační modrou Tušírovací pastou

6.2.2 Tušírovací pasta žlutá

Jedná se o naprosto shodnou pastu včetně vlastností, výhod a nevýhod, které má tušírovací pasta modrá, jen je zde použit místo modrého pigmentu pigment žlutý. Pasta díky němu vytváří lepší kontrast usnadňující čitelnost vzniklého otisku (viz obrázek 42).



Obrázek 42: Vzhled otisku s identifikační žlutou Tušírovací pastou

6.2.3 Barva Acrylic

Druh barvy:

Identifikační žlutá akrylátová barva, která je založena na vodní bázi.

Vlastnosti:

Barva se snadně nanáší pomocí štětce. Aplikace je díky své tekutosti rychlá a dojde k vytvoření tenké jedolité vrstvy bez viditelných známek tahů štětce. Nanesená tloušťka dosahuje větší hodnoty než u referenční barvy. Její tekutost a jemnost vytvoří patrný otisk i v takových místech, kde ke kontaktu ploch boků zubů sice nedochází, ale jejich vzdálenost je natolik malá, že dojde ke kontaktu barvy se spoluzabírajícím zubem. Značná tekutost barvy způsobuje, že dochází k jejímu pomalému stékání a kvůli tomu výsledná vrstva nemá konstantní tloušťku. Dále barva nemá stálé vlastnosti a dochází s postupem času k jejímu zasychání. Barva je zaslá během cca 7 minut. Tato vlastnost může negativně ovlivnit reálnou velikost otisku díky nesetření zaslé vrstvy. Otisk nelze vyhotovit u zaslé vrstvy, protože nedochází k jejímu setření, ale k trhání. Proto se musí zkouška provést, je-li barva v tekutém stavu. Tekutost má za následek, že barva je vtažena zpět na patě zubu směrem k hlavě, dojde-li k vytvoření otisku během jedné otáčky (viz obrázek 43). K čištění povrchu se používají běžně dostupné rozpouštědla, např. voda či technický líh. Hlavní předností této barvy je, že nevznikají nepříjemné výpary od chemických látek obsažených ať už v barvě nebo rozpouštědlech. Smytí identifikační barvy je velice snadné.

Výhody:

- Nanesená vrstva je jedolité, neobsahuje výrazné tahy štětcem.
- Vytvoření patrného otisku i v místech, kde je spoluzabírající zub natolik blízko, že dojde pouze ke kontaktu barvy se zubem, nikoli zub se zubem.
- Dobrý kontrast vytvořeného otisku.
- Snadná aplikace a smývání.
- Nevznikají nepříjemné výpary od chemických látek.

Nevýhody:

- Nanesená vrstva nedrží konstantní tloušťku – stéká.
- Barva nemá stálé vlastnosti v dlouhém časovém horizontu – zasychá.
- Výsledná velikost otisku může být ovlivněna vlivem neseťření zaschlé barvy.
- Barva je při identifikaci vtažena zpět směrem k hlavě zubu, zkresluje tak výsledný otisk vytvořený během jedné otáčky.



Obrázek 43: Vzhled otisku s identifikační barvou Acrylic

6.2.4 Barva Prima

Druh barvy:

Identifikační matná červená akrylová barva, která je založena na acetonové bázi.

Vlastnosti:

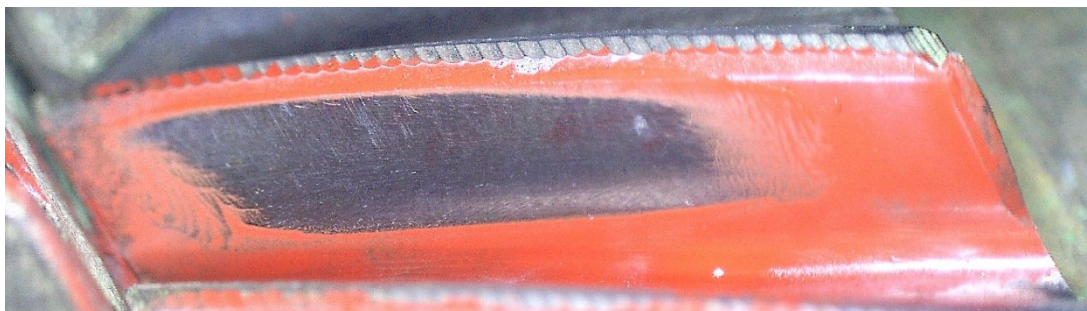
Barva se snadně nanáší pomocí štětce. Aplikace je díky své tekutosti velice rychlá a dojde k vytvoření tenké jedolité vrstvy bez viditelných známek tahů štětce. Nanesená tloušťka dosahuje přibližně stejné hodnoty jako u referenční barvy. Barva nemá stálé vlastnosti a dochází k poměrně rychlému zasychání během cca 2 minut po aplikaci. Díky tomu nedochází ke stékání a výsledná vrstva má konstantní tloušťku. To však může negativně ovlivnit reálnou velikost otisku díky neseťření zaschlé vrstvy. Je proto nezbytně nutné provést zkoušku v poměrně krátkém intervalu od nanesení identifikační vrstvy. Jelikož je během vytváření otisku barva v částečně zaschlém stavu, tak nedochází ke vtažení barvy zpět na patě zubu směrem k hlavě, dojde-li k vytvoření otisku během jedné otáčky (viz obrázek 44). Otisk nelze vyhotovit u zaschlé vrstvy, v tomto stavu nedojde k setření barvy během záběru, ale pouze jen k jejímu potrhání a sedření na určitých místech. K čištění povrchu se používají běžně dostupná rozpouštědla, např. Speciální nitroředidlo C 6000 apod. Smytí identifikační barvy je velice snadné.

Výhody:

- Nanesená vrstva drží konstantní tloušťku – nestéká.
- Barva není při identifikaci vtažena zpět směrem k hlavě zubu, nezkruskuje tak výsledný otisk vytvořený během jedné otáčky.
- Jednotlivá vrstva neobsahuje výrazné tahy štětcem.
- Matný povrch neodráží světlo.
- Dobrý kontrast vytvořeného otisku.
- Snadná aplikace a smývání.

Nevýhody:

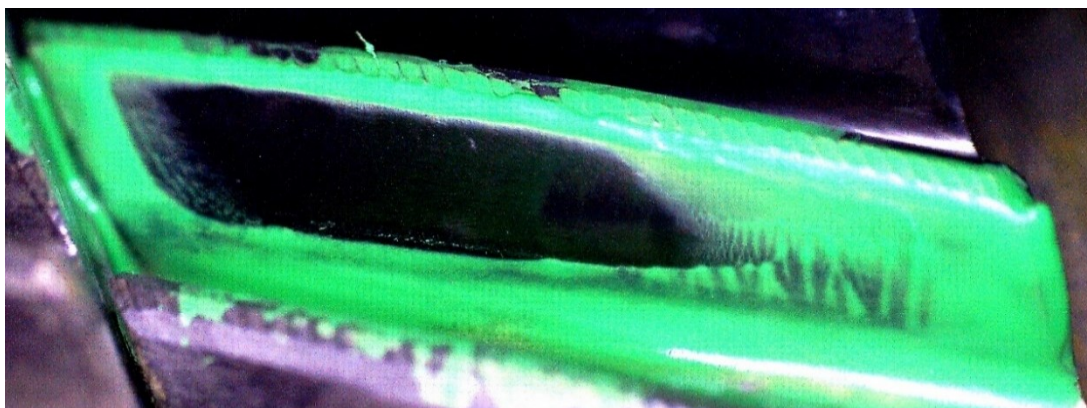
- Barva nemá stálé vlastnosti v časovém horizontu – rychle zasychá.
- Výsledná velikost otisku může být ovlivněna vlivem neseřízení zaschlé barvy.
- Celkově nižší citlivost identifikační vrstvy při stírání pod malým zatížením.



Obrázek 44: Vzhled otisku s identifikační barvou Prima

6.2.5 Barva Prisma

Jedná se o naprosto shodnou barvu včetně vlastností, výhod a nevýhod, které má předešlá barva Prima, jen je zde použit místo červeného pigmentu pigment zelený (viz obrázek 45). Jediná změna je v zaschlém stavu, kdy nedochází k odírání, ale k trhání, protože barva je víc pružná.



Obrázek 45: Vzhled otisku s identifikační barvou Prisma

6.2.6 Tempera

Druh barvy:

Identifikační červená tempera, která je založena na vodní bázi. Byl rovněž vyzkoušen bílý odstín s naprosto shodnými výsledky.

Vlastnosti:

Barva se obtížněji nanáší pomocí štětce. Aplikaci ztěžuje velká hustota identifikační barvy, ve které vznikají velmi výrazné tahy štětcem. Zároveň výsledná tloušťka je podstatně větší než u referenční barvy, ale nedochází u ní ke stékání. Jelikož je barva poměrně hrubé struktury, nedojde během záběru ozubení k jejímu celkovému odstranění a vzniku čistého otisku. V otisku zůstanou viditelné zbytky nesetřené vrstvy. Barva nemá stálé vlastnosti, k zasychání dochází poměrně rychle, cca během 3 min. Tato vlastnost může negativně ovlivnit reálnou velikost otisku díky nesetření zaschlé vrstvy. Otisk nelze vyhotovit u zaschlé vrstvy, kdy nedochází k setření, ale k trhání nanesené vrstvy. Proto se musí zkouška provést, je-li barva v tekutém stavu. Tekutost má za následek, že barva je vtažena zpět na patě zubu směrem k hlavě, dojde-li k vytvoření otisku během jedné otáčky (viz obrázek 46). K čištění povrchu se používají běžně dostupná rozpouštědla, např. voda či technický líh. Hlavní předností této barvy je, že nevznikají nepříjemné výpary od chemických látek obsažených ať už v barvě nebo rozpouštědlech. Smytí identifikační barvy je velice snadné.

Výhody:

- Nanosená vrstva drží konstantní tloušťku – nestéká.
- Snadné smývání.
- Nevznikají nepříjemné výpary od chemických látek.

Nevýhody:

- Barva nemá stálé vlastnosti v dlouhém časovém horizontu – zasychá.
- Nanosená vrstva není jednotná, obsahuje výrazné tahy štětcem.
- Výsledná velikost otisku může být ovlivněna vlivem nesetření zaschlé barvy.
- Špatný kontrast vytvořeného otisku.
- Barva je při identifikaci vtažena zpět směrem k hlavě zubu, zkresluje tak výsledný otisk vytvořený během jedné otáčky.



Obrázek 46: Vzhled otisku s identifikační Temperou

6.2.7 Olejová barva

Druh barvy:

Identifikační matná titanová běloba, která je založena na olejové bázi. Byly rovněž vyzkoušeny odstíny světle a tmavě žluté s naprosto shodnými výsledky.

Vlastnosti:

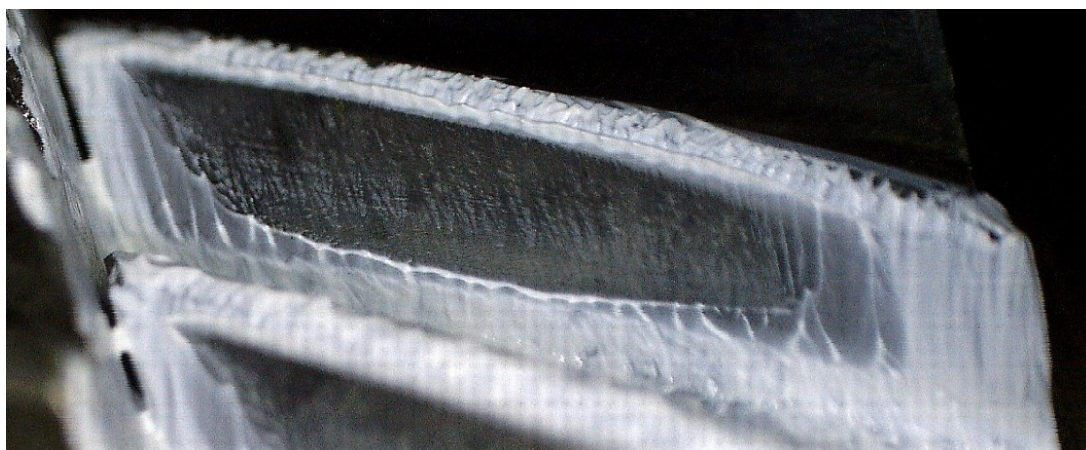
Barva se obtížněji nanáší pomocí štětce. Aplikace je ztížena kvůli poměrně velké hustotě identifikační barvy, ve které vznikají velmi výrazné tahy štětcem. Zároveň výsledná tloušťka je podstatně větší než u referenční barvy, ale nedochází u ní ke stékání. I přesto že barva nemá stálé vlastnosti, tak k zasychání dochází jen velmi pozvolně během cca 10 min. Její značná tloušťka společně s jemností a schopností nezasychávat vytvoří patrný otisk i v takových místech, kde ke kontaktu ploch boků zubů sice nedochází, ale jejich vzdálenost je natolik malá, že dojde ke kontaktu barvy se spoluzabírajícím zubem. Stálá tekutost má za následek, že barva je vtažena zpět na patě zubu směrem k hlavě, dojde-li k vytvoření otisku během jedné otáčky (viz obrázek 47). K čištění povrchu se používají běžně dostupná rozpouštědla, např. Speciální nitroředidlo C 6000 apod. Smytí identifikační barvy je velice snadné.

Výhody:

- Nanesená vrstva drží konstantní tloušťku – nestéká.
- Vytvoření patrného otisku i v místech, kde je spoluzabírající zub natolik blízko, že dojde pouze ke kontaktu barvy se zubem, nikoli zub se zubem.
- Matný povrch neodráží světlo.
- Dobrý kontrast vytvořeného otisku.
- Snadná aplikace a smývání.

Nevýhody:

- Barva nemá stálé vlastnosti v dlouhém časovém horizontu – pomalu zasychá.
- Barva je při identifikaci vtažena zpět směrem k hlavě zubu, zkresluje tak výsledný otisk vytvořený během jedné otáčky.
- Nanesená vrstva není jednodušá, obsahuje výrazné tahy štětcem.
- Poměrně velká tloušťka nanesené vrstvy.



Obrázek 47: Vzhled otisku s identifikační Olejovou barvou

6.2.8 Oxid titaničitý

Druh barvy:

Identifikační bílý oxid titaničitý ve formě prášku, který je rozpuštěný v technickém líhu.

Vlastnosti:

Barva se velice snadno nanáší pomocí štětce. Aplikace je díky své tekutosti rychlá a dojde k vytvoření velice tenké jednodušé vrstvy o stejnoměrné tloušťce bez výrazných známek tahů štětcem. Nanesená tloušťka dosahuje menší hodnoty než u referenční barvy. Dlouhodobá stálost umožňuje její aplikaci na povrch boku zubu po libovolně dlouhou dobu. Po nanesení barvy je nezbytně nutné, aby vrstva uschla. Tento proces trvá nanejvýš 30 sekund díky snadnému odpařování líhu. Nedochozí tak ke stékání nanesené vrstvy a zároveň barva není vtažena zpět u spodní hrany vzniklého otisku na patě zubu směrem k hlavě i za podmínky, dojde-li k vytvoření otisku během jedné otáčky (viz obrázek 48). K čištění povrchu se používají běžně dostupná rozpouštědla, např. voda, technický líh, apod. Smytí identifikační barvy je velice snadné.

Výhody:

- Vytvoření velice tenké identifikační vrstvy.
- Barva má stálé vlastnosti v dlouhém časovém horizontu – je zaschlá.
- Nanosená vrstva drží konstantní tloušťku – nestéká.
- Barva není při identifikaci vtažena zpět směrem k hlavě zubu, nezkrsluje tak výsledný otisk vytvořený během jedné otáčky.
- Jednotlivá vrstva neobsahuje výrazné tahy štětcem.
- Matný povrch neodráží světlo.
- Dobrý kontrast vytvořeného otisku.
- Snadná aplikace a smývání.

Nevýhody:

- Výsledný otisk je vhodné vyhotovit při více pootočení z důvodu nižší citlivosti identifikační barvy.



Obrázek 48: Vzhled otisku s identifikační barvou Oxid titaničitý

6.3 Dílčí závěr

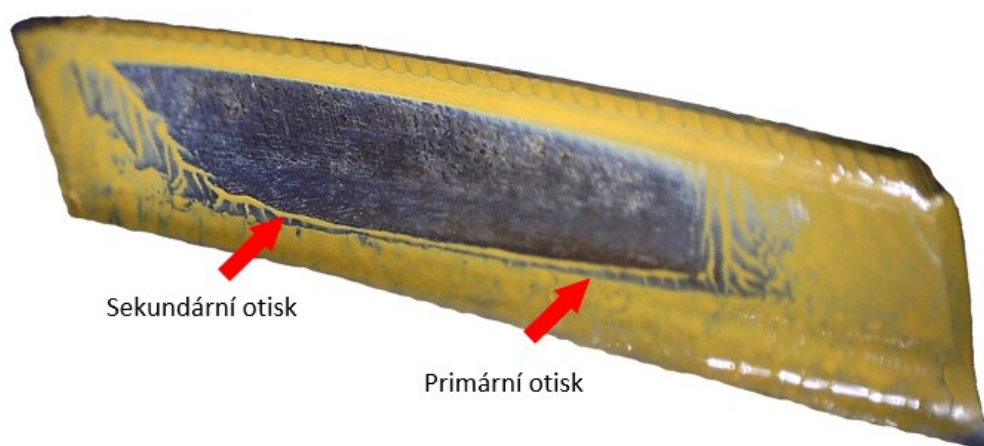
Provedený experiment prokázal, že nelze ke zkouškám využít barvu, která má měnit se vlastnosti vzhledem k časovému průběhu. Identifikační barva proto musí být buď ve stavu stále tekutém, nebo stále zaschlém. Jakýkoli jiný stav může ovlivnit skutečnou velikost otisku z hlediska nesetření více či méně zaschlé identifikační vrstvy. Dále je velice důležité, aby barva vytvářela výborný kontrast mezi nanesenou vrstvou vzhledem k barvě zubu z hlediska snadné čitelnosti otisku. Samozřejmostí je nestékavost barvy a vytvoření velice tenké jednotlivé vrstvy o konstantní tloušťce po celém povrchu boku zubu.

Z výše uvedených vlastností vyplývá, že nelze použít jednu univerzální identifikační barvu, která bude vhodná pro všechny typy zkoušek, jenž se teoreticky dají z problematiky měření otisků pomocí identifikačních barev vyčíst.

7 Rozbor otisků z hlediska počtu pootočení

Tento experiment je prováděn na základě nejasnosti mezi zavedenou praxí a poznatky zjištěných při experimentech. Jedná se o ověření, zda výsledný otisk je postačující zhotovit během jednoho pootočení nebo musí vzniknout jeho průměrováním při několikanásobném pootočení, kdy dojde ke kontaktu s více zuby. Z tohoto důvodu je provedena série experimentů na zkušebním soukolí, které definitivně potvrdí jaký způsob zhotovování otisků je ten správný.

Zároveň během provádění experimentů na zkušebním soukolí s různými druhy identifikačních nátěrových hmot se často vyskytoval problém s vytvořením sekundární hrany otisku na patě zubu. Tento fakt se objevoval u všech barev, které během vytváření otisku byly v tekutém stavu. U barev částečně zaschlých, případně zcela zaschlých se přestal tento jev objevovat. Z tohoto důvodu je zapotřebí zjistit, zda se jedná o sekundární otisk zapříčiněný sražením hlavy spoluzabírajícího kola nebo pouze o potažení barvy zpět vlivem jejího přilnutí k hlavě spoluzabírajícího kola. Na následujícím obrázku (obrázek 49) je názorně vyznačen daný problém se vzniklým sekundárním otiskem.



Obrázek 49: Detail primárního a sekundárního otisku

K ověření této skutečnosti jsou z provedených zkušebních experimentů v předchozí kapitole vybrány dvě barvy, které nejlépe vyhovují zkušebním podmínkám dle kritérií průmyslového partnera. Zásadním kritériem při výběru identifikační barvy je důraz na stálé vlastnosti v dlouhém časovém horizontu, tedy aby barva byla pořád tekutá nebo zaschlá. Tomuto kritériu vyhovovala referenční barva Gear marking compound a Oxid titaničitý.

Jednotné podmínky pro provádění experimentů:

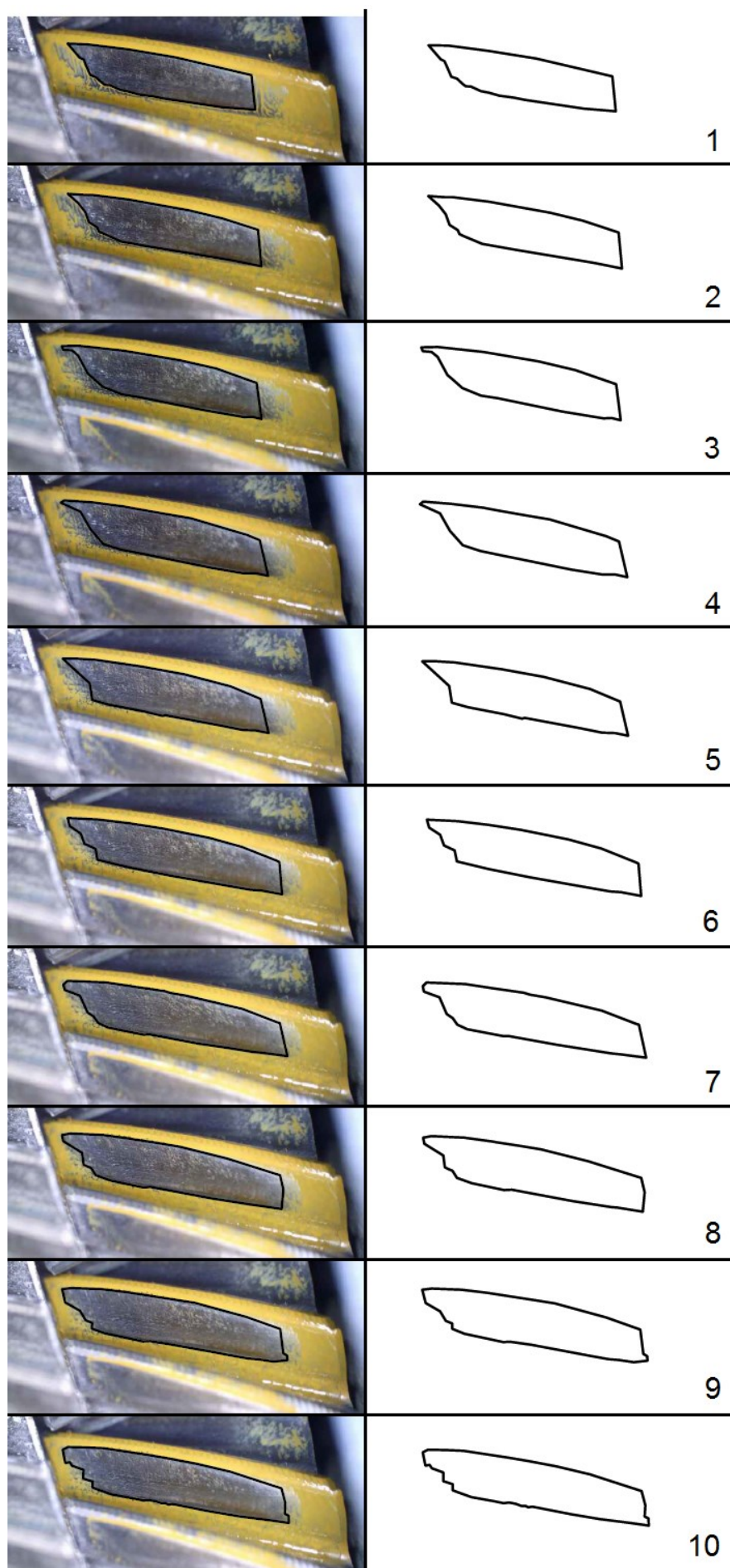
- Identifikační barva musí být nanесena pokaždé na stejný zub hnacího kola.
- Při opakování experimentu musí být zajištěno, aby zub hnacího kola zabíral s totožnými zuby spoluzabírajícího kola jako v předchozím experimentu.
- Experiment bude proveden při zatížení soukolí krouticím momentem o velikost 50 N·m.
- Experiment vznikne během desíti pootočení.
- Během každého pootočení bude vzniklý otisk vyfotografován.
- Fotografování otisku bude provedeno během celého experimentu ze stejného místa a vzdálenosti.

Díky těmto podmínkám je vyloučena odchylka nepřesnosti jednotlivých zubů vzniklých během výroby, která by zásadním způsobem ovlivnila možnost srovnání provedených pokusů s různými barvami.

Data k níže uvedeným grafům se nacházejí v elektronické podobě na CD disku v příloze pod označením Otisky.dwg a Data_otisky.xlsx. Soubor Otisky.dwg obsahuje odměřené rozměry jednotlivých otisků. Soubor Data_otisky.xlsx obsahuje zpracované rozměry ve formě tabulek, ze kterých níže uvedené grafy vycházejí.

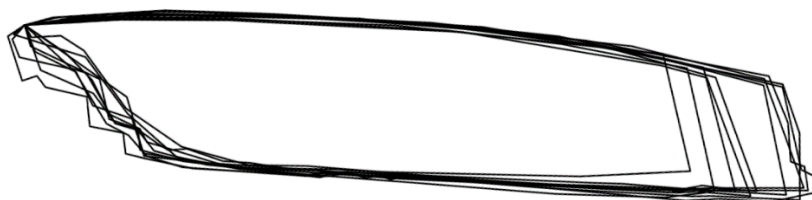
7.1 Gear marking compound

Průběh zkoušky probíhal přesně dle výše uvedených kritérií. Na následujícím obrázku (obrázek 50) je vyobrazena série desíti fotografií vzniklých během zkoušky. Za obrys otisku je vždy považován ten, který navazuje na dokonale setřenou plochu zubu, tzn. hranici určuje sekundární otisk. Obrys vzniklého otisku je obtažen černou čarou.



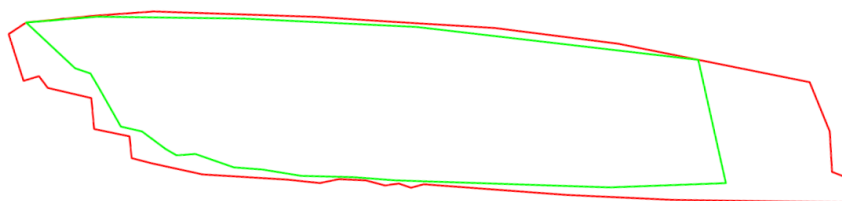
Obrázek 50: Série 10 fotografií během 10 pootočení s barvou Gear marking compound

Ze zkoušky je patrné, že se tvar a velikost otisku v průběhu otáčení značně mění. Aby byla tato skutečnost lépe viditelná, je na následujícím obrázku (obrázek 51) proloženo do sebe všech deset zhotovených otisků. Z obrázku vyplývá, že během otáčení dochází k podstatnému nárůstu záběrové plochy. Tato změna je způsobena eliminací sekundárního otisku, kdy dochází zejména ke značnému nárůstu šířky dotyku spoluzabírajících zubů.



Obrázek 51: Proložení 10 otisků

Porovnání změny velikosti nárůstu otisku mezi prvním pootočením (vyznačeného zelenou barvou) a desátým pootočením (vyznačeného červenou barvou) je proveden na následujícím obrázku (obrázek 52).



Obrázek 52: Proložení 1. a 10. otisku

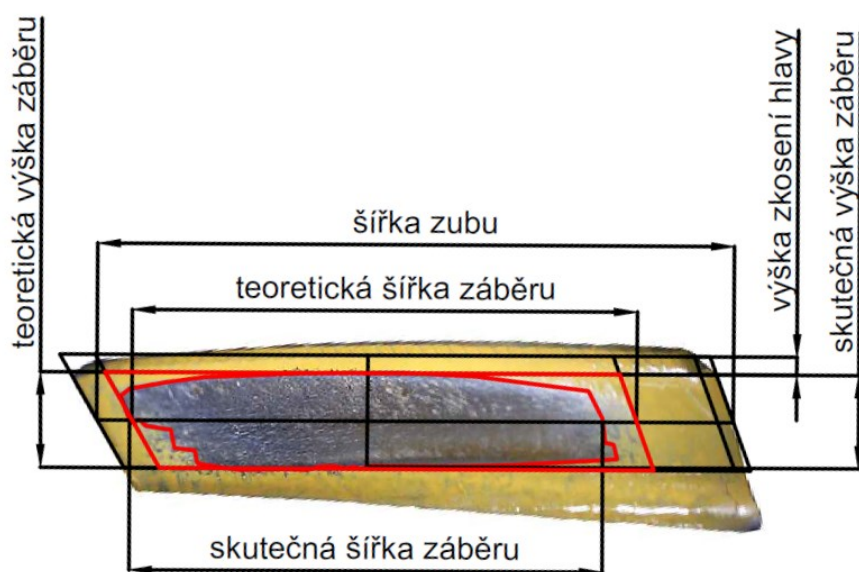
Příčiny eliminace hranice sekundárního otisku na hranici primárního otisku:

- Testované soukolí má takový převodový poměr, že během zkoušky dojde k záběru zubu na hnacím kole s desíti různými zuby na hnaném kole.
- Barva je ve stále tekutém stavu a je schopna ulpívat na spoluzabírajícím zubu při jejím vtažení zpět na patě zubu směrem k hlavě → zvětšování výšky otisku.
- Barva rovněž ulpívá na spoluzabírajícím zubu, je-li mezera mezi zuby natolik malá, že dochází pouze ke kontaktu zubu a barvy → zvětšování šířky otisku.
- Svou roli v tomto případě hrají i odchylky vzniklé během výroby ozubení, kdy dochází k záběru zubů pokaždé v jiných místech a díky tomu dochází ke zmíněné eliminaci sekundárního otisku → zvětšování výšky a šířky otisku.

Aby bylo možné zjištěné poznatky vyhodnotit, je zapotřebí každý otisk zvlášť přeměřit dle následujícího obrázku (obrázek 53). Ke zjištění požadovaných rozměrů je využíván software

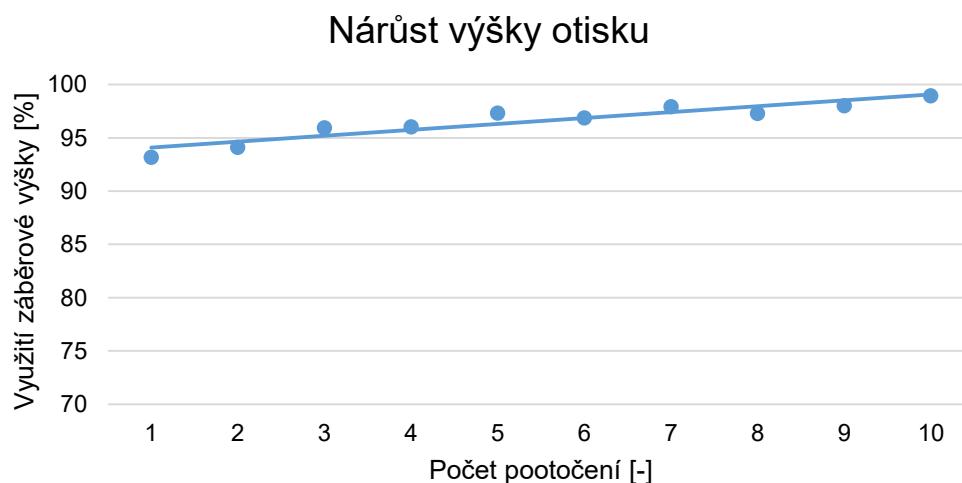
AutoCAD. Díky kterému lze rychle a přesně zjistit požadované rozměry včetně teoretické plochy dotyku zubů a skutečné plochy vzniklého otisku (obě vyznačené červenou barvou).

Do zjištěných rozměrů je však vnesená chyba, kdy dochází k převodu 3D plochu zubu na 2D obraz ve formě fotografie. Tato chyba je navíc doplněna o zkreslení vlivem jejího pořízení pod určitým úhlem a ne kolmo k ploše zubu. Pořízení fotografie kolmo k zubu je nemožné, jelikož dochází k zakrytí snímaného zubu jiným zubem. Vnesenou chybu do vyhodnocování můžeme zanedbat, protože se jedná o chybu systematickou, která nabývá stále stejných hodnot.



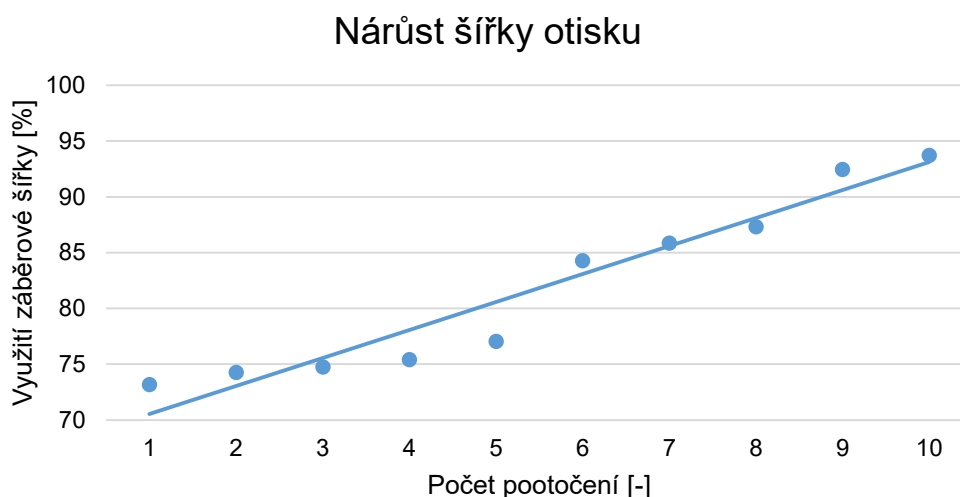
Obrázek 53: Schématické zobrazení odměřovaných hodnot k vyhodnocení

Následující graf (obrázek 54) popisuje procentuální nárůst výšky otisku vzhledem k počtu pootočení. Navýšení v tomto případě činí přibližně 6% a je způsobeno eliminací sekundárního otisku na patě zubu (viz obrázek 49).



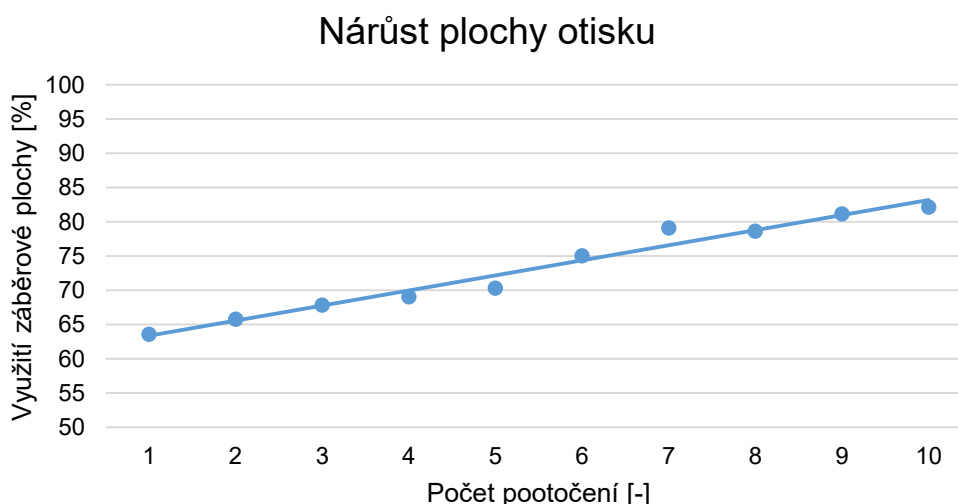
Obrázek 54: Procentuální nárůst výšky otisku vzhledem k počtu pootočení

Následující graf (obrázek 55) popisuje procentuální nárůst šířky otisku vzhledem k počtu pootočení a dosahuje přibližně 20%. Toto vysoké číslo může značně ovlivňovat poznatky získaných ze zkoušky, u které došlo pouze k jednomu pootočení nebo k desíti pootočení. Skokové změny v grafu jsou mimo jiné způsobeny dorovnáváním brzdného odporu na zkušebním zařízení pro dodržení konstantního zatěžujícího krouticího momentu.



Obrázek 55: Procentuální nárůst šířky otisku vzhledem k počtu pootočení

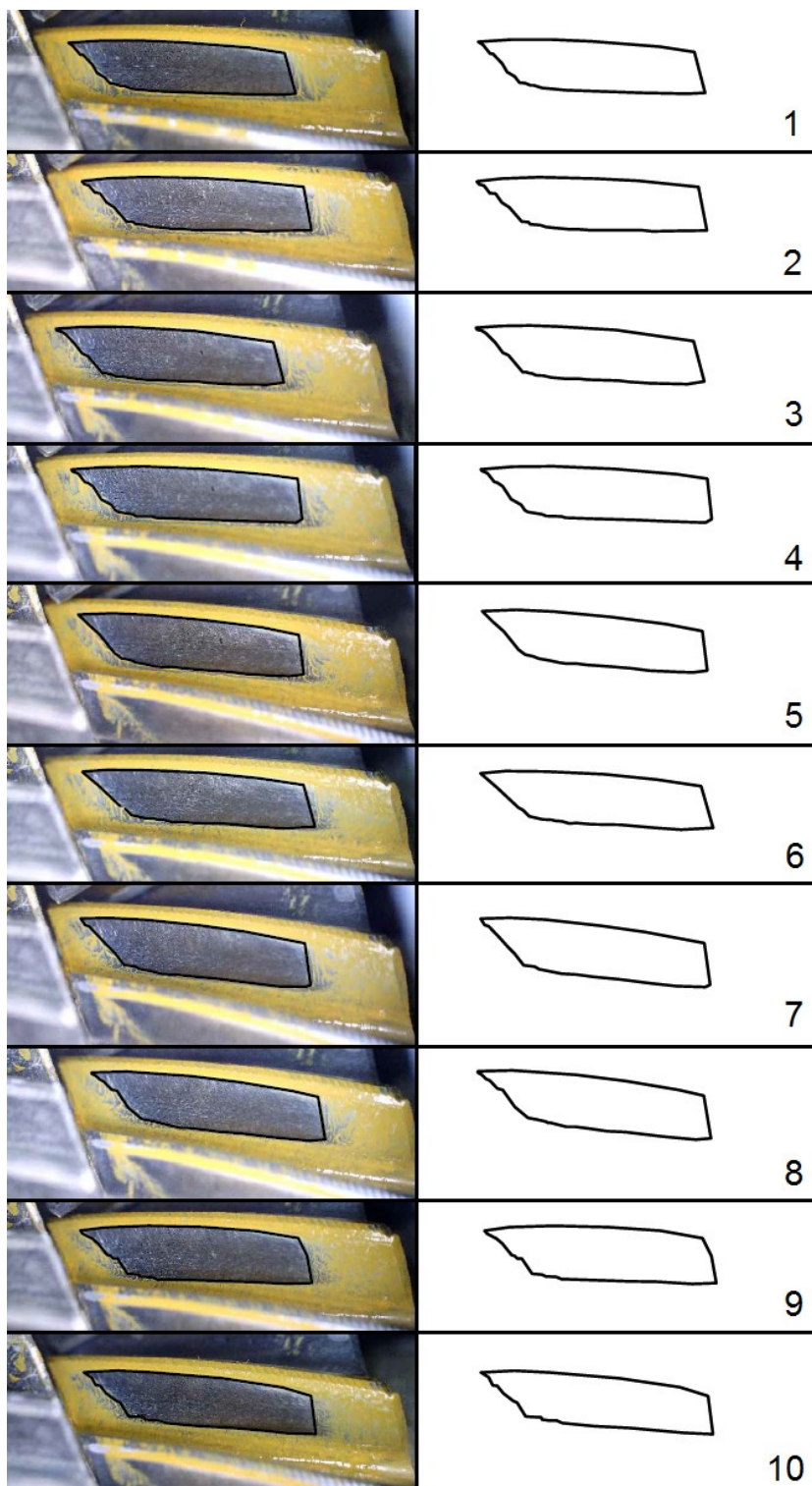
Následující graf (obrázek 56) popisuje procentuální nárůst plochy otisku vzhledem k počtu pootočení. Navýšení v tomto případě činí přibližně 18% a je způsobeno kombinací změny výšky a šířky otisku.



Obrázek 56: Procentuální nárůst plochy otisku vzhledem k počtu pootočení

7.2 Ověření vlivu působení různorodosti tvarů vyrobených zubů

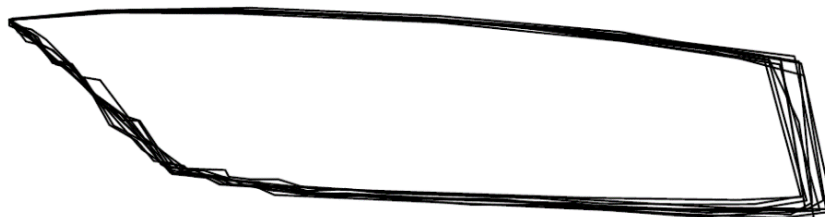
Tato podkapitola se věnuje problematice z hlediska míry ovlivnění velikosti zhotoveného otisku během několika pootočení v závislosti na nepřesnosti vyrobených zubů. Proto je zopakovaná zkouška z předešlé podkapitoly 7.1 na totožných spoluzabírajících zubech, s tím rozdílem, že po každém pootočení je znovu obnovena vrstva identifikační barvy, (viz obrázek 57). Obrys vzniklého otisku je obtažen černou čarou.



Obrázek 57: Série 10 fotografií během 10 pootočení s barvou Gear marking compound

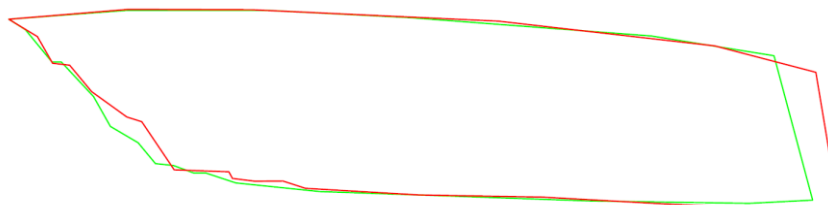
Vyhodnocení zkoušky proběhne totožným způsobem, aby bylo později možné naměřené data porovnat.

Zkouška prokázala, že působení různorodosti tvarů vyrobených zubů má jen minimální vliv na výsledný tvar a velikost otisku. Tato skutečnost je lépe viditelná na následujícím obrázku (obrázek 58), kde je proloženo do sebe všech deset zhotovených otisků. Z obrázku vyplývá, že během otáčení dochází jen k minimálnímu nárůstu plochy otisku. Vyrobené odchylky nemají podstatný vliv na značný nárůst šířky dotyku spoluzabírajících zubů.



Obrázek 58: Proložení 10 otisků

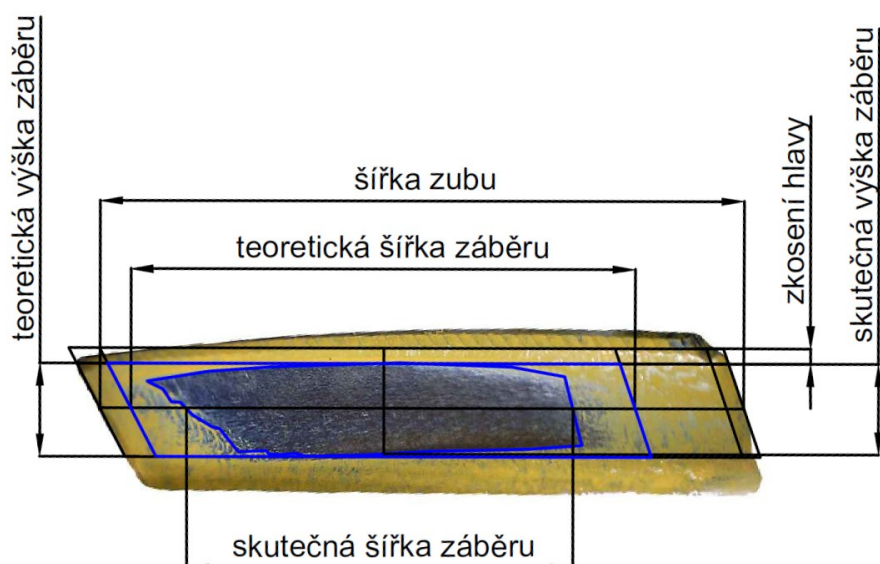
Porovnání změny velikosti nárůstu otisku mezi prvním pootočením (vyznačeného zelenou barvou) a desátým pootočením (vyznačeného červenou barvou) je provedeno na následujícím obrázku (obrázek 59).



Obrázek 59: Proložení 1. a 10. otisku

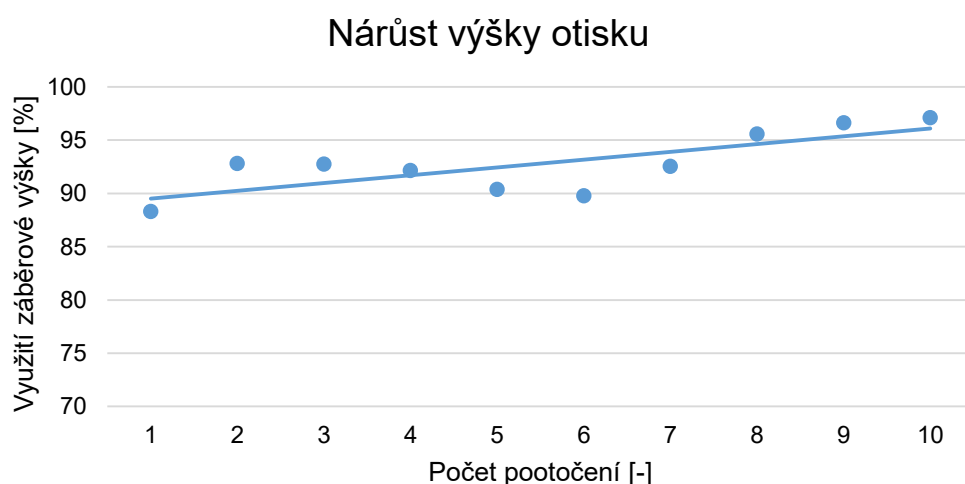
Vyhodnocení otisků je provedeno totožným způsobem jako v předchozí podkapitole 7.1. Zjišťovaly se opět totožné parametry, jejichž schématické vyobrazení je provedeno na následujícím obrázku (obrázek 60). Teoretické plochy záběru a skutečné plochy vzniklého otisku jsou vyznačené modrou barvou.

Na chybě systematické se v tomto případě podílel i fakt, že fotografování nemohlo být provedeno z totožného místa během snímání celé série desíti snímků. Optické zařízení muselo být po každém pootočení odstraněno, aby bylo možné nanést novou vrstvu identifikační barvy na povrch zubu.



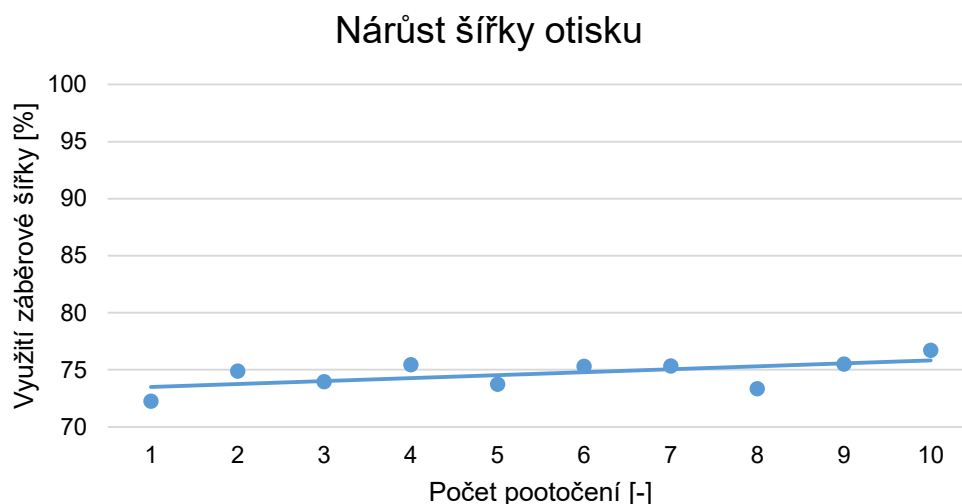
Obrázek 60: Schématické zobrazení odměřovaných hodnot k vyhodnocení

Následující graf (obrázek 61) popisuje procentuální nárůst výšky otisku vzhledem k počtu pootočení. Navýšení v tomto případě činí přibližně 7% a je způsobeno zejména kvůli nedodržení podmínky, která měla zaručit pořizování fotografií ze stejného místa během snímání celé série. Změna úhlu snímacího zařízení ke snímanému zubu podstatně ovlivní míru zkreslení výšky zubu a nedochází tak ke stejnoměrné systematické chybě z hlediska zkreslení.



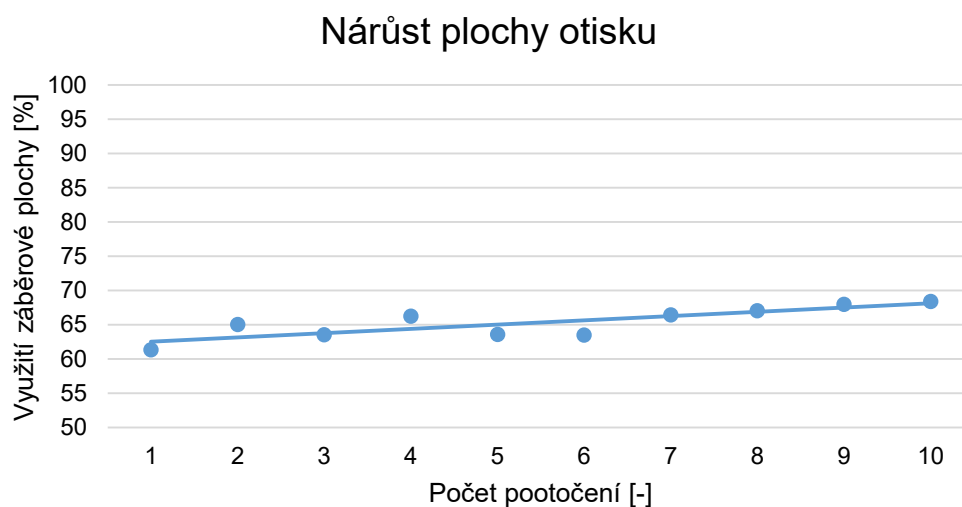
Obrázek 61: Procentuální nárůst výšky otisku vzhledem k počtu pootočení

Následující graf (obrázek 62) popisuje procentuální nárůst šířky otisku vzhledem k počtu pootočení a dosahuje přibližně 3%. Toto číslo dokazuje, že vliv různorodosti tvarů vyrobených zubů má jen minimální účinek na nárůst šířky otisku. Zároveň hodnocení nebylo ovlivněno změnou úhlu optického zařízení jako u hodnocení výšky z důvodu vždy přesného odměření šířky zubu.



Obrázek 62: Procentuální nárůst šířky otisku vzhledem k počtu pootočení

Následující graf (obrázek 63) popisuje procentuální nárůst plochy otisku vzhledem k počtu pootočení. Navýšení v tomto případě činí přibližně 8% a je způsobeno kombinací změny výšky a šířky otisku.

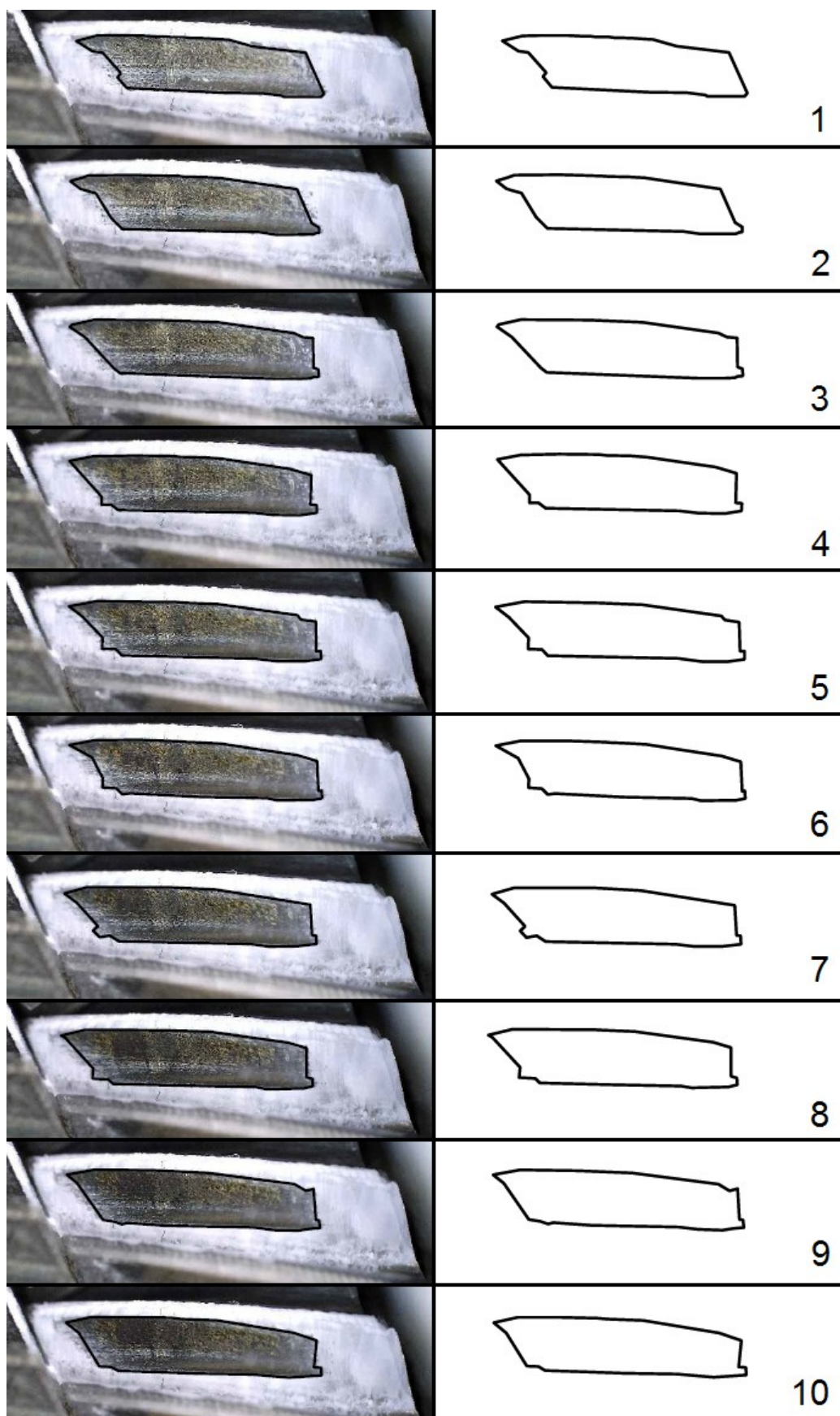


Obrázek 63: Procentuální nárůst plochy otisku vzhledem k počtu pootočení

7.3 Oxid titaničitý

Z výše uvedeného experimentu v podkapitole 7.2 je zřejmé, že hlavním faktorem ovlivňujícím zvětšování záběrového pole vzhledem k počtu pootočení není různorodost tvarů vyrobených zubů, které by zabíraly pokaždé v jiném místě se zkoušeným zubem, ale ulpívání zkušební barvy na zubech spoluzabírajícího kola. Z tohoto důvodu je při tomto experimentu použita identifikační barva v zaschlém stavu, u které nedojde k nežádoucímu ulpívání barvy. Na následujícím obrázku (obrázek 64) je vyobrazena série desíti fotografií vzniklých během

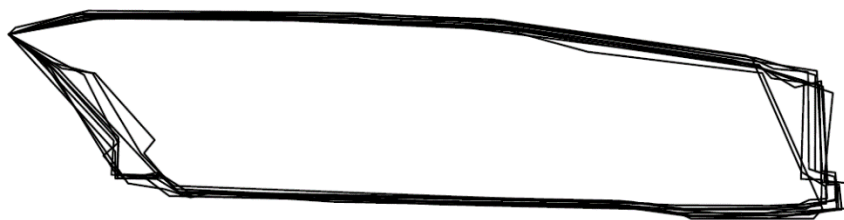
zkoušky. Za obrys otisku je vždy považován ten, který navazuje na dokonale setřenou plochu zubu, tzn. hranici určuje sekundární otisk. Obrys vzniklého otisku je obtažen černou čarou.



Obrázek 64: Série 10 fotografií během 10 pootočení s barvou Oxid titaničitý

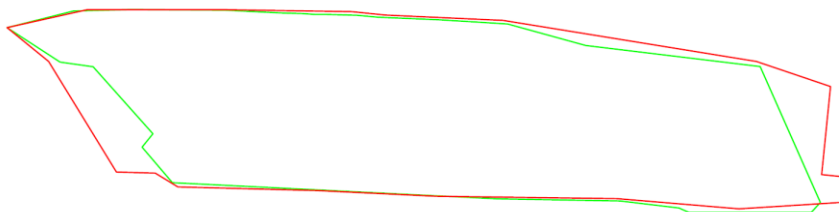
Vyhodnocení opět proběhne totožným způsobem jako u předchozích dvou zkoušek, z důvodu, aby bylo později možné naměřené data porovnat.

Ze zkoušky je patrné, že se tvar a velikost otisku v průběhu otáčení sice mění, ale podstatně menším způsobem, než u identifikační barvy Gear marking compound. Změna plochy záběrové pole je lépe viditelná na následujícím obrázku (obrázek 65), kde je proloženo do sebe všech deset zhotovených otisků. Z obrázku vyplývá, že během otáčení dochází jen k jejímu minimálnímu nárůstu. Tato skutečnost potvrzuje tvrzení, že u identifikačních barev, které jsou ve stále tekutém stavu, dochází k ulpívání barvy na spoluzabírajícím zubu v případě, kdy dojde pouze ke kontaktu nanesené vrstvy barvy se spoluzabírajícím zubem.



Obrázek 65: Proložení 10 otisků

Porovnání změny velikosti nárůstu otisku mezi prvním pootočením (vyznačeného zelenou barvou) a desátým pootočením (vyznačeného červenou barvou) je proveden na následujícím obrázku (obrázek 66).



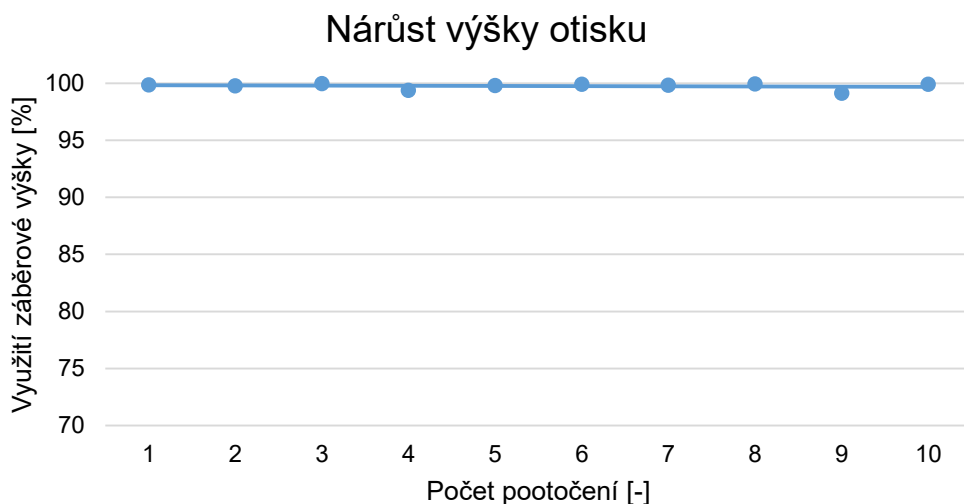
Obrázek 66: Proložení 1. a 10. otisku

Vyhodnocení vzniklých otisků je provedeno totožným způsobem jako v předchozích podkapitolách 7.1 a 7.2. Zjišťovaly se opět totožné parametry, jejichž schématické vyobrazení je provedeno na následujícím obrázku (obrázek 67). Teoretické plochy záběru a skutečné plochy vzniklého otisku jsou vyznačené zelenou barvou.



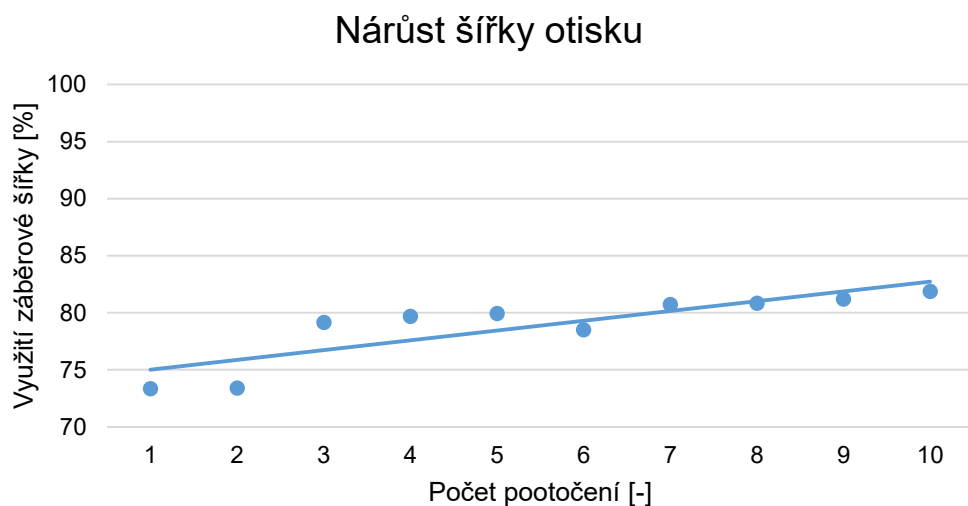
Obrázek 67: Schématické zobrazení odměřovaných hodnot k vyhodnocení

Následující graf (obrázek 68) popisuje procentuální nárůst výšky otisku vzhledem k počtu pootočení. Navýšení v tomto případě činí zanedbatelné 1% a potvrzuje tak teorii, že identifikační barvy, které jsou v průběhu zkoušky v tekutém stavu, jsou vtaženy zpět na patě zubu směrem k hlavě. Díky tomu dojde k vytvoření sekundární hrany otisku (viz obrázek 49).



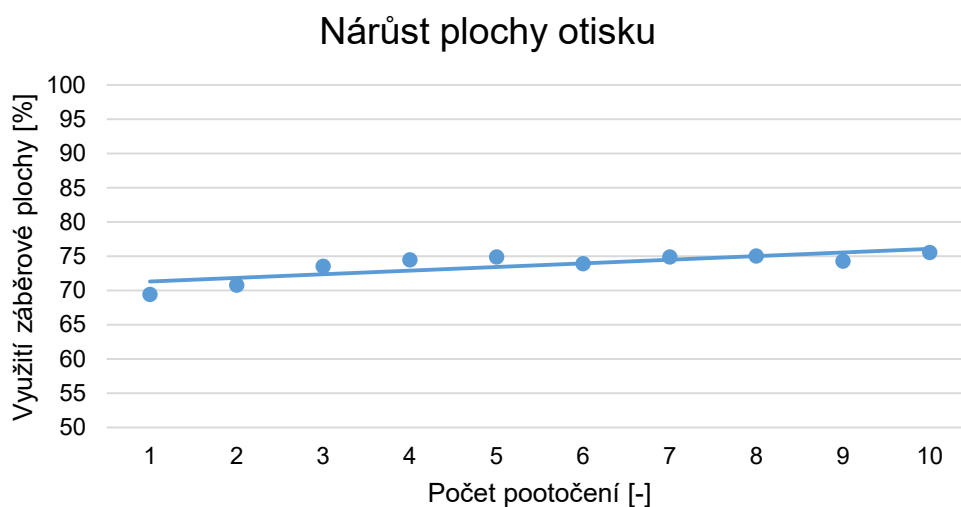
Obrázek 68: Procentuální nárůst výšky otisku vzhledem k počtu pootočení

Následující graf (obrázek 69) popisuje procentuální nárůst šířky otisku vzhledem k počtu pootočení. Nárůst v tomto případě dosahuje přibližně 9%. Toto číslo značně ovlivňují první dva body, jelikož při vyhodnocení otisků nebyla identifikační barva v levé části jasně setřena. Tento fakt následně způsobuje viditelný zub, který lze pozorovat ve zmíněné levé části otisku u prvních dvou pootočení. To má za následek podstatné zmenšení šířky otisku při vyhodnocování.



Obrázek 69: Procentuální nárůst šířky otisku vzhledem k počtu pootočení

Následující graf (obrázek 70) popisuje procentuální nárůst plochy otisku vzhledem k počtu pootočení. Navýšení v tomto případě činí přibližně 6% a je způsobeno kombinací změny výšky a šířky otisku.



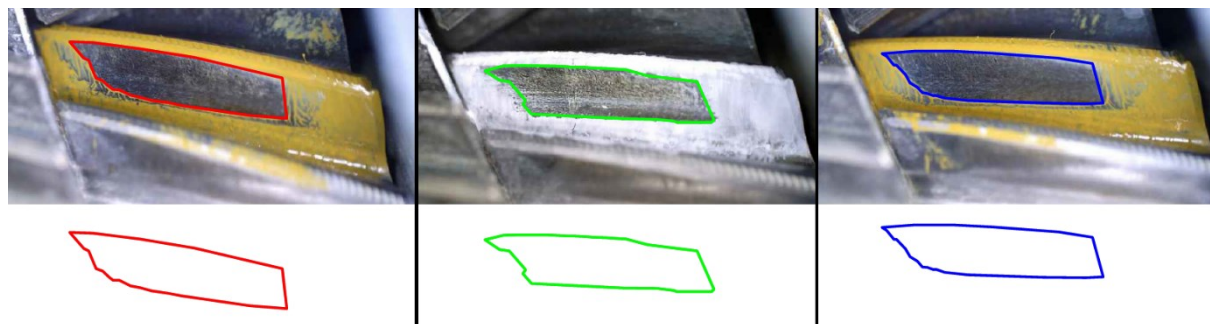
Obrázek 70: Procentuální nárůst plochy otisku vzhledem k počtu pootočení

7.4 Porovnání otisků

Porovnání číselných hodnot v jednotlivých grafech přináší zajímavé výsledky. Z tohoto důvodu jsou v této podkapitole z hlediska geometrického vzhledu porovnány otisky ze všech tří metod.

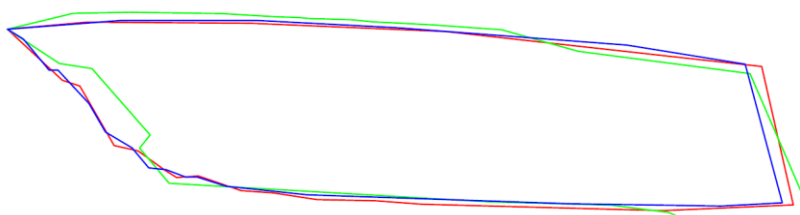
7.4.1 Srovnání otisků při 1. pootočení

Číselné hodnoty se v grafech u 1. pootočení zásadním způsobem neliší. Z toho důvodu je na následujícím obrázku (obrázek 71) provedeno srovnání otisků ze všech zhotovených experimentů.



Obrázek 71: Srovnání otisků při 1. pootočení

Na následujícím obrázku (obrázek 72) je proloženě zobrazeno porovnání velikosti otisku při prvním pootočení. Červeně je vyznačen otisk z experimentu v podkapitole 7.1, zeleně je z experimentu v podkapitole 7.3 a modře je z experimentu v podkapitole 7.2.



Obrázek 72: Proložení otisků získaných během provedených experimentů pro 1. pootočení

Z tohoto proložení je zřejmé, že hodnocení otisku při prvním pootočení je velice objektivní, a to i z hlediska různých vlastností použitých identifikačních barev. Tvar a velikost otisků se zásadním způsobem od sebe neliší. Detailně popsany rozbor vzniku otisků z hlediska počtu pootočení je proveden v následující podkapitole 7.5.

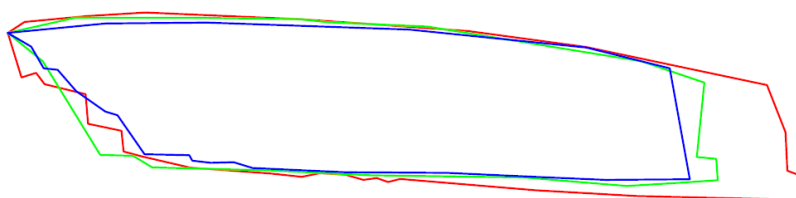
7.4.2 Srovnání otisků při 10. pootočení

Naměřené číselné hodnoty otisků při 10. pootočení se během všech experimentů ve výše uvedených grafech značně liší. Z těchto důvodů je pro lepší názornost provedeno srovnání vzhledů otisků při 10. pootočení (viz obrázek 73).



Obrázek 73: Srovnání otisků při 10. pootočení

Na následujícím obrázku (obrázek 74) je proloženě zobrazeno porovnání velikosti otisku při desátém pootočení. Červeně je vyznačen otisk z experimentu v podkapitole 7.1, zeleně z experimentu v podkapitole 7.3 a modře z experimentu v podkapitole 7.2.



Obrázek 74: Proložení otisků získaných během provedených experimentů pro 10. pootočení

Proložení velmi názorně zobrazuje, že hodnocení otisku při desátém pootočení nemusí být pro konkrétně použitý druh identifikační barvy objektivní, jelikož jeho tvar a velikost záleží právě na vlastnostech identifikační barvy. Detailně popsany rozbor vzniku otisků z hlediska počtu pootočení je proveden v následující podkapitole 7.5.

7.5 Dílčí závěr

Experiment provedený v podkapitole 7.2 prokázal, že není potřeba zhotovit výsledný otisk při kontaktu s více spoluzabírajícím zuby za účelem vytvoření průměrného otisku z hlediska různorodosti tvarů zubů. Z tohoto důvodu nezáleží, při kolikátém pootočení dojde k vytvoření výsledného otisku, jelikož jeho velikost není zásadně ovlivněna tímto faktorem. Proto je vždy nutné volit potřebný počet pootočení k objektivnímu vyhodnocení zkoušky nejen z hlediska parametru, který chceme hodnotit, ale také podle vlastností konkrétní identifikační barvy.

7.5.1 Vliv na hodnocení výšky

Dle vyhotovených grafů (viz obrázek 54, obrázek 61 a obrázek 68) je zřejmé, že ke správnému otisku dochází, je-li procentuální využití výšky záběrové plochy zubu blíží se hodnotě 100%.

a) Gear marking compound

Z hlediska hodnocení využití výšky záběrového pole je vhodné, aby výsledný otisk vznikl minimálně během desíti pootočení. Při menším počtu pootočení dochází ke vtažení identifikační barvy na patě zubu směrem k hlavě zubu a díky tomu vzniká falešný sekundární otisk, který zmenšuje reálně využitou výšku zubu. Barva při každém pootočení částečně ulpí na spoluzabírajícím zubu a několikanásobné pootočení způsobí, že dojde k odstranění barvy, která je vtahována zpět směrem k hlavě zubu.

b) Oxid titaničitý

Z hlediska hodnocení využití výšky záběrového pole nezáleží, zda výsledný otisk vznikne během jednoho nebo desíti pootočení. Barva je při provádění zkoušky zaschlá, a proto nedochází ke vtahování identifikační barvy na patě zubu směrem k hlavě. Díky této vlastnosti nedochází k žádnému vzniku falešného sekundárního otisku, který by zmenšoval reálně využitou výšku zubu.

7.5.2 Vliv na hodnocení šířky

Hodnocení šířky je obdobné jako u hodnocení výšky, dle grafů (viz obrázek 55, obrázek 62 a obrázek 69) je zřejmé, že ke správnému otisku dochází, je-li procentuální využití šířky záběrové plochy zubu pohybující se kolem hodnoty 82%.

a) Gear marking compound

Z hlediska hodnocení využití šířky záběrového pole je vhodné, aby výsledný otisk vznikl do pěti pootočení. I toto doporučení silně závisí na přísnosti hodnocení vyhotoveného otisku při určování hranice začátku vtahování identifikační barvy zpět směrem k hlavě zubu. Nicméně větší počet pootočení už není přípustný, protože dochází ke zvětšení záběrového pole, které neodpovídá reálnému průběhu záběru. Během několikanásobného pootočení dochází k ulpívání identifikační barvy v místech, kde se sice plochy zubů nedotýkají, ale dotýká se vrstva identifikační barvy se spoluzabírajícím zubem. Ta díky své stálé tekutosti a dobré přilnavosti k povrchu ulpívá na pokaždé čistém spoluzabírajícím zubu a tím dojde k vytvoření zvětšené šířky výsledného otisku.

b) Oxid titaničitý

Z hlediska hodnocení využití šířky záběrového pole nezáleží, zda výsledný otisk vznikne během jednoho nebo desíti pootočení. Avšak k vytvoření naprosto zřetelného otisku je vhodné, aby došlo alespoň ke třem pootočení. Barva je při provádění zkoušky zaschlá, a proto může dojít během prvních dvou pootočení k nejednoznačnému setření barvy v místě odvalování spoluzabírajících zubů.

8 Ověření skutečných záběrových poměrů

Tento experiment je proveden na základě skutečnosti, že pomocí otisků lze zjistit skutečnou hodnotu součinitelů trvání záběru profilu a krokem. Díky této kontrole si lze ověřit, zda obecně platná doporučení, která se používají při návrhu ozubeného soukolí, jsou dostačující.

Data k níže uvedeným grafům se nacházejí v elektronické podobě na CD disku v příloze pod označením Data_otisky.xlsx.

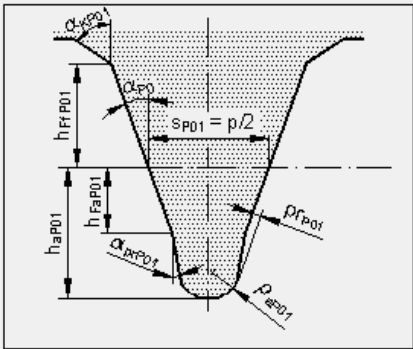
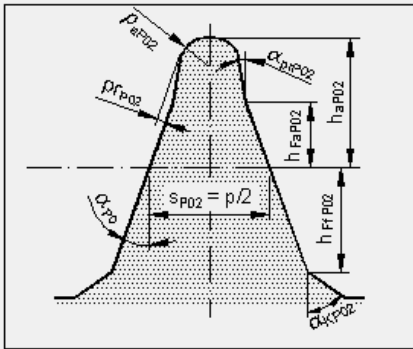
8.1 Geometrický výpočet ozubení

Na Katedře částí a mechanismů strojů byl vyvinut prof. Dr. Ing. Milošem Němčkem speciální software pro geometrický výpočet ozubení. Pomocí zmíněného softwaru je provedena komplexní kontrola soukolí, na kterém se prováděly experimenty. Software vypočítá teoretickou číselnou hodnotu součinitele trvání záběru profilu a součinitele trvání záběru krokem. Ty jsou následně použity pro porovnání skutečného záběru s teoretickým předpokladem. Zadávané údaje do výpočetního softwaru jsou odečteny z výrobních výkresů testovaného soukolí. Vstupní parametry pro výpočet jsou zobrazeny na následujícím obrázku (obrázek 75).

Obrázek 75: Geometrický výpočet ozubení

Poskytnuté výrobní výkresy obsahovaly informace o nástrojích potřebných pro výrobu pastorku a kola. Díky znalosti těchto parametrů je soukolí přesně geometricky vypočteno. Informace o nástrojích obsahovaly parametry určující sražení hlavy a velikost protuberance (podřezání paty zubu, které je odbroušeno během finální úpravy povrchu boku zubu). Vstupní parametry specifikující nástroje pro výrobu pastorku a ozubení jsou zobrazeny na následujícím obrázku (obrázek 76).

Nástroje pro výrobu pastorku a kola
✕

Nástroj pro pastorek

Poměrná výška hlavy h_{aP01}^*

Poměrný rádius zaoblení hlavy ρ_{aP01}^*

Poměrná výška ke sražení h_{FP01}^*

Úhel profilu srážecí hrany α_{KP01} [°]

Úhel profilu protuberance α_{prP01} [°]

Poměrná výška k protuberanci h_{FaP01}^*

Velikost protuberance pr_{P01} [mm]

☒ Sražení hlavy pastorku

☒ Protuberance pastorku

Nástroj pro kolo

Poměrná výška hlavy h_{aP02}^*

Poměrný rádius zaoblení hlavy ρ_{aP02}^*

Poměrná výška ke sražení h_{FP02}^*

Úhel profilu srážecí hrany α_{KP02} [°]

Úhel profilu protuberance α_{prP02} [°]

Poměrná výška k protuberanci h_{FaP02}^*

Velikost protuberance pr_{P02} [mm]

☒ Sražení hlavy kola

☒ Protuberance kola

Obrázek 76: Nástroje pro výrobu pastorku a kola

Detailně rozepsané geometrické rozměry testovaného soukolí, které software dopočetl ze vstupních hodnot, jsou provedeny na následujících obrázcích (obrázek 77 a obrázek 78).

		<i>Rozměr</i>	PASTOREK		KOLO
Typ ozubení			Vnější		Vnější
Normálná boční vůle	j_n	[mm]		0.0000	
Počet zubů	z	[-]	22		43
Počet zubů náhradního kola	z_n	[-]	36.562		71.462
Normální modul	m_n	[mm]		1.640	
Čelní modul	m_t	[mm]		1.961	
Úhel sklonu zubu roztečný	β	[°]		33.25000	
Úhel sklonu zubu základní	β_b	[°]		31.97915	
Úhel záběru čelní	α_t	[°]		17.76565	
Úhel záběru pracovní	α_{wt}	[°]		20.97018	
Osová vzdálenost pracovní	a	[mm]		65.00000	
Osová vzdálenost roztečná	a_d	[mm]		63.73417	
Osová vzdálenost bezvůlová	a_{jn}	[mm]		65.00000	
Jednotková korekce bezvůlová	x_{jn}	[-]	0.69803	$\Sigma = 0.84100$	0.14298
Jednotková korekce	x	[-]	0.69803	$\Sigma = 0.84100$	0.14298
Hodnota posunutí profilu	$x \cdot m_n$	[mm]	1.14476		0.23448
Jednotková změna výšky hlavy	k^*	[-]		0.06915	
Průměr patní kružnice	d_f	[mm]	39.43266		79.29417
základní kružnice	d_b	[mm]	41.08574		80.30394
kr.začátku evolventy	d_{ff}	[mm]	41.87240		82.30229
kružnice začátku záběru	d_{ff}	[mm]	42.45462		82.93709
valivé kružnice	d_w	[mm]	44.00000		86.00000
roztečné kružnice	d	[mm]	43.14313		84.32520
kružnice konce záběru	d_{Ha}	[mm]	48.51054		87.93508
kružnice srážecí hrany	d_{Fa}	[mm]	48.51054		87.93508
hlavové kružnice	d_a	[mm]	48.70000		89.95000
Tvarový přesah	c_f	[mm]	0.29111		0.31740
Tloušťka zubu na patní kružnici	s_f	[mm]	---		---
základní kružnici	s_b	[mm]	3.44107		3.31367
začátku evolventy	s_{ff}	[mm]	3.40060		3.11863
valivé kružnici	s_w	[mm]	2.97988		2.24326
roztečné kružnici	s	[mm]	3.18958		2.70177
začátku sražení	s_{Fa}	[mm]	1.23225		1.60698
hlavové kružnici	s_a	[mm]	0.97792		-0.93985
Výška paty	h_f	[mm]	1.85524		2.51552
hlavy	h_a	[mm]	2.77844		2.81240
zubu	h	[mm]	4.63367		5.32791
Společná šířka kol	b	[mm]		12.400	
Délka evolventy	ev	[mm]	3.65075		2.98526
Délka funkční evolventy	ev	[mm]	3.35200		2.65870
Měrný skluz na patě		[-]	-0.71428		-1.43154
Měrný skluz na hlavě		[-]	0.58874		0.41666
Poměr b/d	ψ_d	[-]	0.287		0.147
Poměr b/m_n	ψ_m	[-]		7.561	
Součinitel trvání záběru profilu	ε_α	[-]		1.28671	
Součinitel trvání záběru krokem	ε_β	[-]		1.31960	
Součinitel trvání záběru celkový	ε_γ	[-]		2.60631	
Délka dotyku 1 páru zubů	L_{pmax}	[mm]		14.25424	
Celková délka dotyku minim.	L_{zmin}	[mm]		17.79472	
Celková délka dotyku maxim.	L_{zmax}	[mm]		20.97095	
Čelní rozteč	p_t	[mm]		6.16082	
Čelní rozteč základní	p_{tb}	[mm]		5.86703	

Obrázek 77: Geometrické rozměry pastorku a kola (část 1/2)

		<i>Rozměr</i>	PASTOREK		KOLO
KONTROLNÍ ROZMĚRY					
Kontrolní rozměr přes zuby	W	[mm]	18.37103		33.17359
Měřeno na průměru	dW	[mm]	43.94166		85.09135
Počet měřených zubů	z_w	[-]	4		7
Minimální šířka kola pro měření	b_{min}	[mm]	10.073		18.189
Měřená konstant. tloušťka zubu	s_c	[mm]	2.97592		2.52078
Měřeno v konst. výšce (od hlavy)	h_c	[mm]	2.37974		2.47468
Kontrolní rozměr přes kuličky	M	[mm]	47.14480		90.08668
Průměr kuličky	d_t	[mm]	2.38194		3.15203
Průměr kontaktu kuliček	dM	[mm]	44.00000		86.00000
ZÁKLADNÍ PROFIL					
Poměrná výška hlavy profilu	h'_{ap}	[-]	1.36632		1.51876
Poměrná hlavová vůle profilu	c'_p	[-]	0.31051		0.31051
Poměrný rádius paty profilu	P'_{fp}	[-]	0.36585		0.42683
Úhel profilu	α_p	[°]		15.00000	
HŘEBENOVÝ NÁSTROJ					
Poměrná výška hlavy	h'_{ap0}	[-]	1.82927		1.67683
Poměrný rádius zaoblení hlavy	P'_{ap0}	[-]	0.36585		0.42683
Poměrná výška ke sražení	h'_{fpp0}	[-]	0.79268		0.91463
Úhel profilu srážecí hrany	α_{kp0}	[°]	45.00000		45.00000
Úhel profilu protuberance	α_{prp0}	[°]	8.78415		9.30886
Poměrná výška k protuberanci	h'_{Fap0}	[-]	1.37195		1.03659
Velikost protuberance	prp0	[mm]	0.03000		0.05000

Obrázek 78: Geometrické rozměry pastorku a kola (část 2/2)

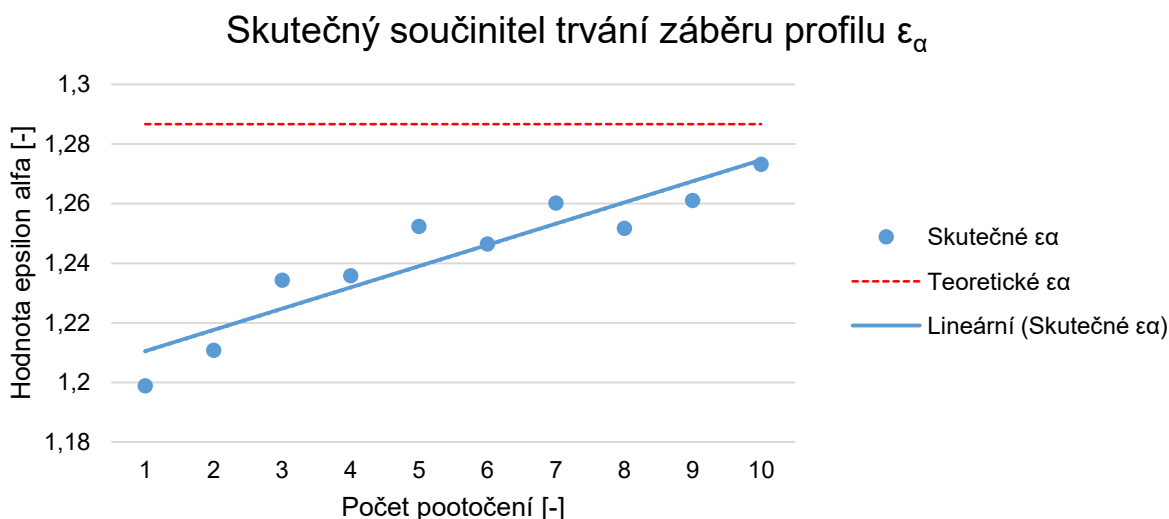
Z geometrického výpočtu soukolí, na kterém se zkoušky s identifikačními povlaky provádí, vyplývá, že teoretická hodnota součinitele trvání záběru profilu dosahuje hodnoty $\varepsilon_\alpha = 1,286$ a teoretická hodnota součinitele trvání záběru krokem dosahuje hodnoty $\varepsilon_\beta = 1,319$.

8.2 Porovnání skutečného záběru s teoretickým předpokladem

Úvodní kapitoly 3 a 3.3 této diplomové práce pojednávají o faktorech ovlivňující skutečnou velikost záběrového pole ozubeného soukolí. Díky provedeným experimentům popsáných v podkapitolách 7.1 a 7.3 lze z vytvořených fotografií odměřit potřebné údaje k dopočtení skutečné hodnoty součinitele trvání záběru profilu ε_α a skutečné hodnoty součinitele trvání záběru krokem ε_β . Tyto jsou zároveň porovnány s teoretickými hodnotami vypočtených v podkapitole 8.1.

8.2.1 Gear marking compound

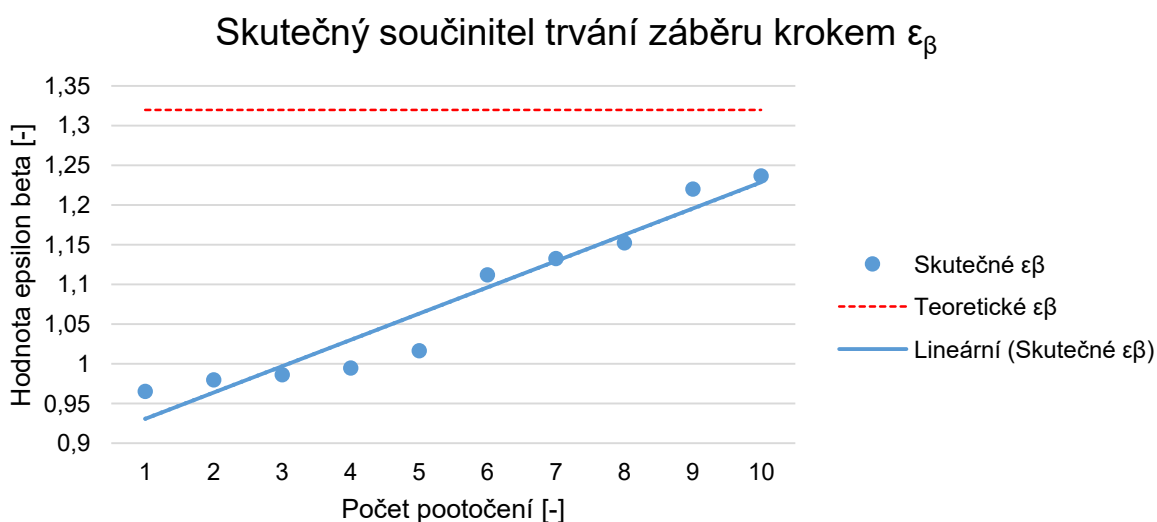
Skutečný součinitel trvání záběru profilu se vypočítá pomocí podílu skutečné výšky záběru ku teoretické výšce záběru (viz obrázek 53) a vzniklý podíl se vynásobí teoretickou hodnotou součinitele trvání záběru profilu. Tento postup je aplikován na všech deset vytvořených otisků. Výsledné hodnoty z těchto výpočtů jsou pro lepší názornost zakresleny v následujícím grafu (obrázek 79).



Obrázek 79: Průběh skutečného součinitele trvání záběru profilu na počtu pootočení

Podle poznatků uvedených v podkapitole 7.5 je provedeno hodnocení odchylky skutečného součinitele trvání záběru profilu k teoretickému součiniteli trvání záběru profilu pro desáté pootočení. V tomto případě vzniká odchylka 1,04% a potvrzuje tvrzení, že je vhodné navýšit uvažovanou hodnotu součinitele trvání záběru profilu o cca 5%. Stanovit naprosto přesnou hodnotu navýšení nelze, jelikož odhad konce funkční evolventy na patě zubu není přesný z důvodu zkreslení obrazu.

Výpočet skutečného součinitele trvání záběru krokem získáme podílem délky otisku ku maximální délce otisku (viz obrázek 53), kdy vzniklý podíl je poté vynásoben teoretickou hodnotou součinitele trvání záběru krokem. Tento postup je aplikován na všech deset vytvořených otisků. Výsledné hodnoty jsou pro lepší názornost zakresleny v následujícím grafu (obrázek 80).



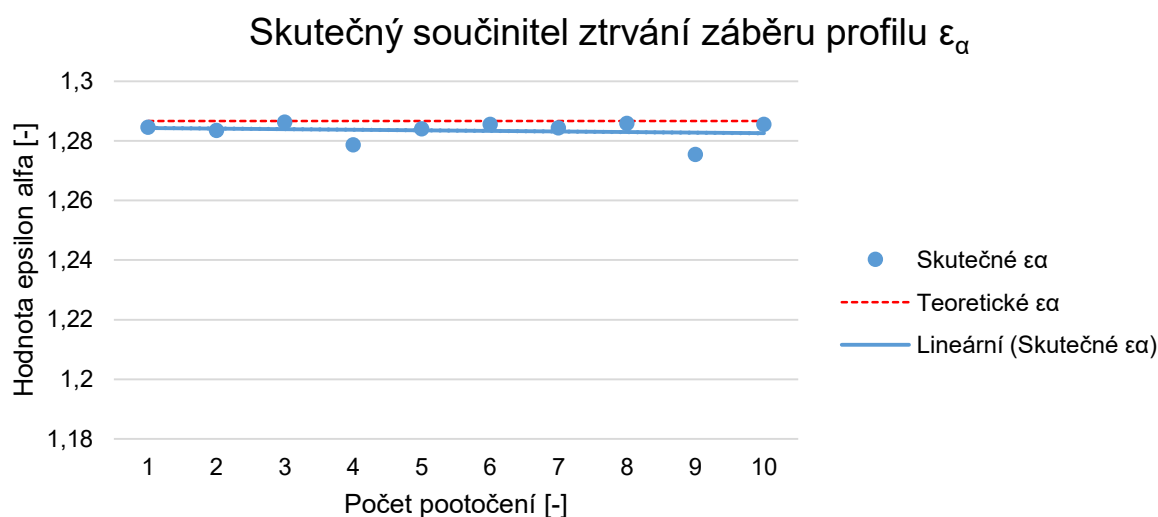
Obrázek 80: Průběh skutečného součinitele trvání záběru krokem na počtu pootočení

Vyhodnocení je opět provedeno podle poznatků uvedených v podkapitole 7.5, proto je zhodnocena odchylka skutečného součinitele trvání záběru krokem k teoretickému součiniteli trvání záběru krokem pro páté pootočení. Vzniká odchylka 22,94% a potvrzuje tvrzení, že je vhodné navýšit uvažovanou hodnotu součinitele trvání záběru krokem o $10 \div 20\%$. V tomto případě však lze mnohem přesněji specifikovat hodnotu navýšení, jelikož je známa přesná hodnota šířky zubu, která se velice snadno na snímku odměřuje. Zároveň míra zkreslení je pokaždé stejná. Z těchto důvodů je možné doporučit navýšení uvažované hodnoty součinitele trvání záběru krokem na horní hranici, tedy o 20%.

8.2.2 Oxid titaničitý

Výpočet potřebných údajů a jejich vyhodnocení opět proběhne totožným způsobem jako u předchozího vyhodnocení s identifikační barvou Gear marking compound, z důvodu, aby bylo později možné zjištěné fakta porovnat.

Skutečný součinitel trvání záběru profilu se vypočítá podílem skutečné výšky záběru ku teoretické výšce záběru (viz obrázek 67), kdy vzniklý podíl se vynásobí teoretickou hodnotou součinitele trvání záběru profilu. Tento postup je aplikován na všech deset vytvořených otisků. Výsledné hodnoty z těchto výpočtů jsou pro lepší názornost zakresleny v následujícím grafu (obrázek 81).

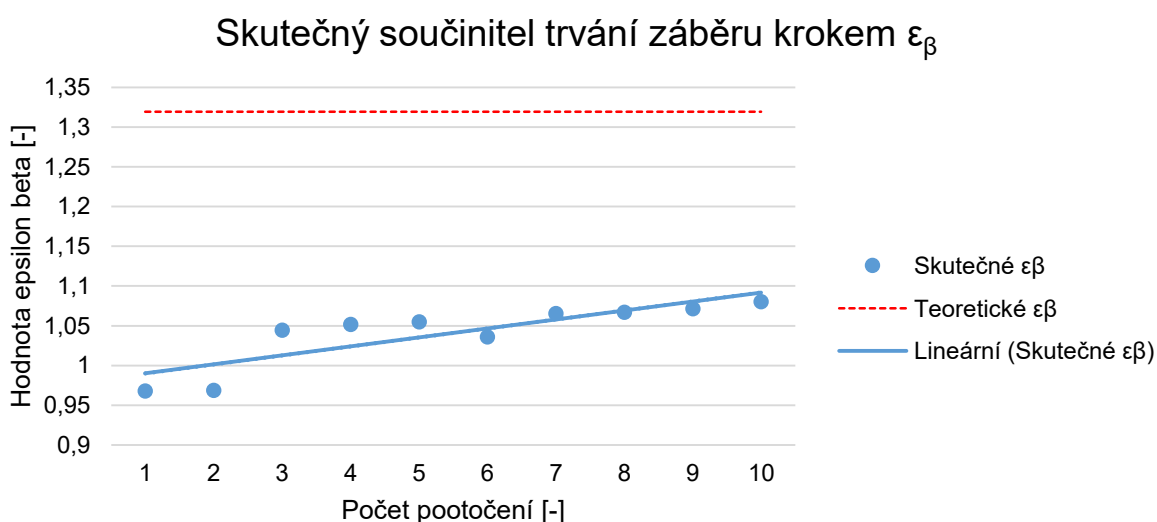


Obrázek 81: Průběh skutečného součinitele trvání záběru profilu na počtu pootočení

Vyhodnocení je opět provedeno podle poznatků z podkapitoly 7.5. Jak již bylo zmíněno, tak zde nezáleží, u kterého pootočení dojde k vyhodnocení skutečného součinitele trvání záběru profilu. Ve všech případech vzniká odchylka cca 0,15% a potvrzuje, že je vhodné navýšit uvažovanou hodnotu součinitele o cca 5%. A opět nelze stanovit naprosto přesnou

hodnotu navýšení, jelikož odhad konce funkční evolventy na patě zubu není přesný z důvodu zkrácení obrazu.

Výpočet skutečného součinitele trvání záběru krokem získáme podílem délky otisku ku maximální délce otisku (viz obrázek 67), kdy vzniklý podíl je vynásoben teoretickou hodnotou součinitele trvání záběru krokem. Tento postup je aplikován na všech deset vytvořených otisků. Výsledné hodnoty jsou pro lepší názornost zakresleny v následujícím grafu (obrázek 82).



Obrázek 82: Průběh skutečného součinitele trvání záběru krokem na počtu pootočení

Vyhodnocení odchylky skutečného součinitele trvání záběru krokem k teoretickému součiniteli trvání záběru krokem je opět provedeno podle poznatků z podkapitoly 7.5. Jak již bylo zmíněno, tak zde nezáleží, u kterého pootočení dojde k vyhodnocení. Nicméně pro jasné vytvořený otisk je vhodné provést alespoň tři pootočení. Pro páté pootočení vzniká odchylka 20,04% a potvrzuje tvrzení, že je vhodné navýšit uvažovanou hodnotu součinitele trvání záběru krokem o $10 \div 20\%$. V tomto případě však lze mnohem přesněji specifikovat hodnotu navýšení, jelikož je známa přesná hodnota šířky zubu, která se velice snadno na snímku odměřuje. Zároveň míra zkrácení je pokaždé stejná. Z těchto důvodů je možné doporučit navýšení uvažované hodnoty součinitele trvání záběru krokem na horní hranici, tedy o 20%.

8.3 Dílčí závěr

Experiment potvrdil, že skutečné hodnoty součinitele trvání záběru profilu ϵ_α a součinitele trvání záběru krokem ϵ_β dosahují hodnot nižších, než jaké stanovuje teoretický výpočet.

U součinitele trvání záběru profilu nelze přesně stanovit, o jak velkou hodnotu by měl být teoretický návrh navýšen, aby bylo v reálné situaci dosaženo zamýšlené hodnoty. Hlavním

důvodem je nemožnost přesného zjištění konce evolventy na patě zubu. Nicméně lze potvrdit obecné doporučení, že to nebude více než 5%.

Podstatně jiná situace nastává u součinitele trvání záběru krokem. V tomto případě je na vyhotovených snímcích vidět celá šířka zubu o známém rozměru. Díky tomu lze velice přesně odměřit a dopočítat skutečnou hodnotu součinitele. Provedené experimenty potvrdily doporučení navyšovat tento součinitel o $10 \div 20\%$. Avšak pomocí naměřených údajů lze doporučit, aby byl součinitel trvání záběru krokem navyšován okolo své horní hranice, tedy o 20%. Rozdíl mezi oběma metodami s použitými různými barvami je $\pm 1,5\%$. Z hlediska nepřesnosti se jedná o zanedbatelnou hodnotu, jelikož cílem tohoto zhodnocení je doporučení na úpravu rozměrů ozubení. Během výroby ozubení vznikají daleko větší odchylky. Z tohoto důvodu lze tento rozdíl zanedbat.

9 Závěr

Na základě teoretických rozborů faktorů ovlivňující výsledné záběrové pole, popsaných v úvodních kapitolách této práce, je vypracován detailní návrh metodiky provádění zkoušky dle kritérií průmyslového partnera, se kterým byla práce konzultována. Ukázalo se, že je-li potřeba zkoušku rychle a opakovaně provádět, a to i při různém zatěžování, je nutné použít zkušební zařízení s otevřeným okruhem a otisky vytvářet pomocí identifikačních barev. Pro možnost provádění otisků při daném provozním zatížení, bylo k experimentům použito zkušební zařízení, které vzniklo za podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu Centra kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka. Prvotní využití tohoto zařízení bylo pro kontrolu průhybů hřídelů. Jeho parametry však byly vhodné i pro zhotovování záběrových otisků. Realizace návrhu metodiky probíhala na zkušebním soukolí v převodovce, kterou poskytl průmyslový partner. Kvůli neshodám mezi zavedenou praxí a poznatkům zjištěných při experimentech byla provedena celá řada experimentů, které se danými problémy zabývaly.

První provedený experiment se týkal vyzkoušení vhodného typu optického záznamu. Daný problém je komplikován tím, že je potřeba otisky snímat ze soukolí v převodové skříni. Na tomto základě byl vybrán nejvhodnější přístroj, který nejlépe odpovídal potřebným požadavkům, aby zhotovená fotografie byla v co nejvyšším rozlišení. Neobsahovala nežádoucí vady a zkreslení obrazu. Díky tomu je zaručená vysoká přesnost odměřování potřebných rozměrů, která má velmi podstatný vliv na vyhodnocování otisků.

Následně byly experimentálně odzkoušeny na zkušebním soukolí různé druhy identifikačních barev a vyhodnoceny jejich charakteristické vlastnosti. Díky tomu bylo možné vybrat vhodné identifikační barvy k měření skutečných záběrových polí. Provedený experiment prokázal, že nelze ke zkouškám využít barvu, která má měnící se vlastnosti vzhledem k časovému průběhu. Identifikační barva proto musí být buď ve stavu stále tekutém, nebo stále zaschlém. Jakýkoli jiný stav může ovlivnit skutečnou velikost otisku z hlediska nesetření více či méně zaschlé identifikační vrstvy. Dále je velice důležité, aby barva vytvářela výborný kontrast mezi nanesenou vrstvou vzhledem k barvě zubu z hlediska snadné čitelnosti otisku. Samozřejmostí je nestékavost barvy a vytvoření velice tenké jednolité vrstvy o konstantní tloušťce po celém povrchu boku zubu. Z výše uvedených vlastností vyplývá, že nelze použít jednu univerzální identifikační barvu, která bude vhodná pro všechny typy zkoušek.

Na poznatcích z předchozích dvou experimentů byl založen experiment týkající se hodnocení otisků vzhledem k počtu pootočení. Pro toto hodnocení byly vybrány dvě nejvhodnější identifikační barvy. Výsledky potvrdily, že počet pootočení má podstatný vliv na výslednou velikost otisku. Ukázalo se, že s narůstajícím počtem pootočení dochází k nárůstu výšky a šířky otisku, zejména u identifikačních barev, které jsou v průběhu zkoušky v tekutém stavu. U stále tekutých barev dochází ke vtahování barvy zpět na patě zubu směrem k hlavě. Vtahování vytváří sekundární hranu otisku, která při prvním pootočení zmenšuje skutečnou

výšku záběru o cca 6%. S navyšujícím se počtem pootočení dojde k odstranění této sekundární hrany vlivem nalepení vtahované barvy na spoluzabírající zuby. Dále pak také dochází s rostoucím počtem pootočení k ulpívání barvy na spoluzabírajícím zubu za situace, kdy dojde pouze k jeho kontaktu s identifikační vrstvou. Tato nežádoucí vlastnost navýší při desátém pootočení šířku otisku o cca 20%. Přičemž bylo experimentálně prokázáno, že není nutné provádět zkoušku způsobem, kdy dojde k dotyku s více zuby spoluzabírajícího kola, aby vznikla průměrná velikost otisku. Vyrobená nepřesnost zubů tento faktor ovlivní jen minimálně. Tyto poznatky můžou být velice podstatné, provádí-li se zkouška při jmenovitém zatížení. Pokud nebudou brány v potaz tyto faktory, může být špatně vyhodnocena správnost provedených modifikací. Problém s ulpíváním stále tekuté barvy je doložen provedením totožné zkoušky s jiným typem barvy, která je v průběhu zkoušky zaschlá. Ukázalo se, že u zaschlé barvy nedochází k podstatným změnám výšky a šířky otisku v závislosti na počtu pootočení.

Poslední provedený experiment se věnuje teoretickému výpočtu zkušebního soukolí, zejména pak výpočtu teoretického součinitele trvání záběru profilu a součinitele trvání záběru krokem. Na základě poznatků z předchozí kapitoly byl vyhodnocen skutečný součinitel trvání záběru profilu a součinitel trvání záběru krokem v porovnání s teoretickým předpokladem. Je potvrzeno obecné doporučení, aby byl teoretický součinitel trvání záběru profilu v návrhu navýšen cca o 5%. Díky přesně provedenému odměřování šířky otisku je rovněž potvrzeno doporučení, aby byl teoretický součinitel trvání záběru krokem v návrhu navýšen cca o $10 \div 20\%$. Avšak pomocí naměřených údajů lze doporučit, aby byl součinitel trvání záběru krokem navyšován okolo své horní hranice, tedy o 20%.

Návrhem k dalšímu rozvoji této metodiky je zjištění přesného konce evolventy na patě zubu. Díky tomu by bylo možné přesně vyčíslit i skutečný součinitel trvání záběru profilu a provádět automatické vyhodnocování otisků pomocí speciálního software např. NI Vision Builder.

Seznam použité literatury

- [1] MORAVEC, Vladimír. *Konstrukce strojů a zařízení II.: čelní ozubená kola : teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola*. První vydání. Ostrava: MONTANEX, 2001. ISBN 80-722-5051-5.
- [2] MORAVEC, Vladimír, Zdeněk DEIL, Miloš NĚMČEK, Zdeněk FOLTA a Jiří HAVLÍK. *Čelní ozubená kola v převodovkách automobilů*. První vydání. VŠB-TU Ostrava: MONTANEX, 2009. ISBN 978-80-7225-304-3.
- [3] Části a mechanismy strojů III: Přednášky 2015-2016. Katedra částí a mechanismů strojů - doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D. [online]. VŠB - TU Ostrava, 2015 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~fol20/>
- [4] Konstruování strojů: převody. *Ústav konstruování* [online]. Brno: VUT, 2007 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska2_6c2.pdf
- [5] MORAVEC, Vladimír. *Ověření dotyku boků zubů převodové skříně SK 14H*. VŠB-TU Ostrava, 2000. Výzkumná zpráva č. D3-390708/347.
- [6] ČSN ISO 1328-1 (014682): Čelní ozubená kola – Soustava přesnosti ISO – Část 1: Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola. Druhé vydání. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [7] ČSN 01 4682 (014682): Ozubené převody čelní. Lícování. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [8] DIN 3990: *Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern*. Frankfurt am Main: Deutsches Institut für Normung e. V., 1987.
- [9] ISO 6336-1: *Calculation of load capacity of spur and helical gears*. International Organization for Standardization, 2006.
- [10] CCTV minikamera – 600TVL. In: *SPYobchod.cz* [online]. Praha 4: SPYobchod.cz, 2016 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.spyobchod.cz/cctv-minikamera-600tvl-78-ir940nm-3/#popis>

Seznam příloh

Sestavný výkres zkušebního zařízení: PAV0102 – 01

Dílenský výkres: PAV0102 – 01 – 06

Dílenský výkres: PAV0102 – 01 – 07

Kompletní diplomová práce včetně výkresové dokumentace v zadaném rozsahu v elektronické podobě na CD disku.

This research has been realized using the support of Technological Agency, Czech Republic, programme Centres of Competence, project # TE01020020 Josef Božek Competence Centre for Automotive Industry. This support is gratefully acknowledged.